

UNIVERSITAT JAUME I

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES EXPERIMENTALS GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**Desarrollo y puesta a punto de una plataforma de ensayos
de manos protésicas antropomorfas y robóticas**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR

Jesús Ángel Cantero Ramis

DIRECTORES

Antonio Pérez González

José Vicente García Ortiz

Castellón, julio de 2019

AGRADECIMIENTOS

Antes de nada, quisiera agradecer a Antonio Pérez González y José Vicente García Ortiz el haber confiado en mí para realizar este proyecto y por haber tenido la paciencia de ser mis directores.

Me gustaría mencionar igualmente a todo el resto del grupo de investigación de biomecánica, en especial a Pepe Fuentes, por su buena acogida y por sus aportaciones técnicas a la hora de elaborar la solución del proyecto.

Quisiera agradecer también a Tanneguy Redarce por haber aceptado una vez más el ser mi profesor tutor por parte del INSA Lyon.

Quisiera mencionar que este trabajo ha sido financiado por la Generalitat Valenciana y por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

Finalmente, me gustaría dar gracias a mi familia. Ellos han sido mi fuente de motivación y mi principal soporte en las dificultades de estos últimos años.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	1
MEMORIA.....	6
1. OBJETO	7
2. ALCANCE.....	7
3. ANTECEDENTES	8
3.1. LA MANO HUMANA	8
3.2. MANOS ARTIFICIALES.....	9
3.3. EL CONTROL DE MANOS PROTÉSICAS.....	12
3.4. EL PROYECTO BENCH-HAND.....	12
3.5. ENSAYOS DE FUNCIONALIDAD DE MANOS	13
4. REQUISITOS DE DISEÑO	16
5. METODOLOGÍA.....	18
5.1. HERRAMIENTA DE DISEÑO DE CIRCUITOS EAGLE V. 9.3.....	18
5.2. HERRAMIENTA DE PROGRAMACIÓN LABVIEW 2018.....	18
5.3. HERRAMIENTA CAD SOLIDWORKS.....	19
5.4. EQUIPOS DE MEDICIÓN.....	20
6. ANÁLISIS DE SOLUCIONES	21
6.1. MOTORES	21
6.1.1. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA.....	21
6.1.2. MOTORES PASO A PASO.....	21
6.1.3. SERVOMOTORES	22
6.1.4. COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES.....	22
6.2. SENSORES PARA EL CONTROL DE POSICIÓN	23
6.2.1. ENCODERS ROTATIVOS	23
6.2.2. SENSORES DE FLEXIÓN	25
6.3. SENSORES PARA EL CONTROL DE FUERZA	26
6.3.1. SENSORES DE PRESIÓN.....	26
6.3.2. SENSORES DE CORRIENTE	27
6.3.3. SENSORES DE PAR	28
6.3.4. SENSORES DE DESLIZAMIENTO	29
6.4. PROCESADOR	30
6.4.1. ARDUINO MEGA.....	30
6.4.2. COMPACTRIO	30

6.5.	INTEGRACIÓN DE LOS DIFERENTES COMPONENTES	31
6.5.1.	MONTAJE MANUAL CON PCB PERFORADO	31
6.5.2.	IMPRESIÓN POR FOTOLITO USANDO PCB CON CAPA FOTORESISTENTE	32
6.5.3.	IMPRESIÓN CON FRESADORA	33
6.6.	ALIMENTACIÓN	33
6.6.1.	FUENTE DE ALIMENTACIÓN INTEGRADA	33
6.6.2.	FUENTE DE ALIMENTACIÓN EXTERNA	34
7.	RESULTADO FINAL	35
7.1.	SISTEMA ESTRUCTURAL	35
7.1.1.	CHASIS DE SOPORTE	35
7.1.2.	BRIDA Y TAPA DE LA BRIDA DE ANCLAJE	36
7.1.3.	SOPORTE ADAPTADO PARA CADA MANO	37
7.1.4.	SOPORTE ADAPTADO PARA LA ELECTROMECAÁNICA	37
7.2.	ELECTRÓNICA	38
7.2.1.	MOTORES	38
7.2.2.	DRIVERS	39
7.2.3.	ENCODERS	40
7.2.4.	SENSORES DE CORRIENTE	41
7.2.5.	EL PROCESADOR	42
7.3.	ALIMENTACIÓN	46
7.4.	CIRCUITO IMPRESO	47
7.5.	CONCEPCIÓN DEL SOFTWARE	50
7.5.1.	PROGRAMACIÓN DE LA SEÑAL PWM	50
7.5.2.	PROGRAMACIÓN DE LA LECTURA DE LOS ENCODERS	53
7.5.3.	PROGRAMACIÓN DE LA LECTURA DE CORRIENTE	55
8.	PRUEBAS DE VALIDACIÓN	58
8.1.1.	COMPROBACIÓN DE LA SEÑAL PWM GENERADA	58
8.1.2.	COMPROBACIÓN DE LA LECTURA DE LOS SENSORES	59
9.	CONCLUSIÓN	60
10.	BIBLIOGRAFÍA	61
	ANEXOS A LA MEMORIA	63
	Anexo I: Documento de especificaciones técnicas sensor de corriente LTSR 6-NP	64
	Anexo II: Documento de especificaciones técnicas micromotor 250:1 HPCB 12V	66

Anexo III: Documento de especificaciones técnicas Driver TB6612FNG	69
Anexo IV: Documento de especificaciones técnicas encoders magnéticos 12CPR	70
Anexo V: Documento de especificaciones técnicas CompactRIO 9049	72
Anexo VI: Documento de especificaciones técnicas fuente FA-665B	75
Anexo VII: Pseudocódigo de los programas en LabVIEW	76
PLIEGO DE CONDICIONES	77
1. CONDICIONES GENERALES	78
1.1. OBJETO	78
1.2. DOCUMENTOS QUE DEFINEN EL PROYECTO	78
1.3. CONDICIONES FACULTATIVAS	78
1.4. CONDICIONES DEL CONTRATO DEL PROYECTISTA	78
1.5. ACCIDENTES DE TRABAJO	79
1.6. CONDICIONES GENERALES DE EXPLOTACIÓN	79
1.7. NORMATIVA	79
1.8. PLAZOS Y CONDICIONES GENERALES DEL PROYECTO	80
1.9. RESPONSABILIDAD DEL PROYECTISTA	80
2. CONDICIONES PARTICULARES	80
2.1. CONDICIONES DEL SOFTWARE UTILIZADO	80
2.2. DOSSIER TÉCNICO	80
3. CONDICIONES DE SUMINISTRO	81
3.1. ESPECIFICACIÓN DE MATERIALES	81
3.2. ESPECIFICACIONES PARA LA ADQUISICIÓN DE COMPONENTES	81
3.3. ESPECIFICACIONES DE EJECUCIÓN	82
4. RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD	83
PRESUPUESTO	84
1. HONORARIOS DE INGENIERO	85
2. AMORTIZACIONES	85
2.1. AMORTIZACIÓN DEL HARDWARE	85
2.2. AMORTIZACIÓN DEL SOFTWARE	86
2.3. COSTE TOTAL AMORTIZACIONES	86
3. COSTE DEL MATERIAL	87
4. RESUMEN DEL PRESUPUESTO	88
4.1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	88
4.2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	88

PLANOS.....	89
1. Plano 1: Negativo del circuito impreso para fotolito	91
2. Plano 2: Chasis de soporte de la PACMAR	92
3. Plano 3: Brida de anclaje y tapa de la brida de anclaje.....	93
4. Plano 4: Soporte adaptado para la Imma Hand	94
5. Plano 5: Soporte para los motores de la PACMAR.....	95
6. Plano 6: Pieza de fijación para los motores	96

MEMORIA

1. OBJETO

Este proyecto nace de la necesidad de evaluar el funcionamiento de diferentes modelos de manos artificiales antropomorfas diseñadas por el grupo de investigación de Biomecánica y Ergonomía de la UJI, facilitar el desarrollo de sus sistemas de control y poder comparar los desarrollos con los realizados por otros grupos de investigación externos o empresas comerciales. La realización de pruebas físicas sobre prototipos de manos requería del desarrollo de una plataforma de ensayos sobre la que poder montar las manos y realizar ensayos automáticamente, tanto durante el funcionamiento de dichas manos en movimiento libre, como realizando agarres sobre objetos.

Este trabajo se enmarca en el contexto del proyecto de investigación BENCH-HAND [1], financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, cuyo objetivo es el desarrollo de métodos, equipos y protocolos para la evaluación objetiva de la funcionalidad de manos artificiales, así como el desarrollo de manos robóticas y protésicas mejoradas. Dentro de las tareas del proyecto BENCH-HAND, este TFM se enmarca en la tarea correspondiente al desarrollo de una Plataforma Automática de Control de Manos Antropomorfas y Robóticas (PACMAR). La plataforma PACMAR debe permitir la realización de ensayos para sistemas de control de manos protésicas y robóticas, tanto desde el punto de vista del hardware como del software.

En el apartado de hardware se incluye un chasis que sirva de soporte tanto para las manos como para los motores encargados del accionamiento de las mismas, en caso de que no estén embebidos dentro de la estructura de la mano. Asimismo, también se incluye la parte electrónica, compuesta de un microcontrolador y de los periféricos necesarios para pilotar los motores, así como también de una tarjeta de circuito impreso PCB y de las conexiones necesarias para llevar a cabo la integración total del sistema.

El apartado de software consiste en un algoritmo de control programado sobre el microcontrolador. Para ello, se deberán elaborar además modelos obtenidos a partir de la identificación del sistema a controlar.

2. ALCANCE

Dada la gran envergadura del desarrollo de la plataforma PACMAR, inabarcable en el periodo de tiempo disponible para el desarrollo del presente TFM, el trabajo a desarrollar se centra en el diseño y concepción del sistema electrónico y en la programación del mismo.

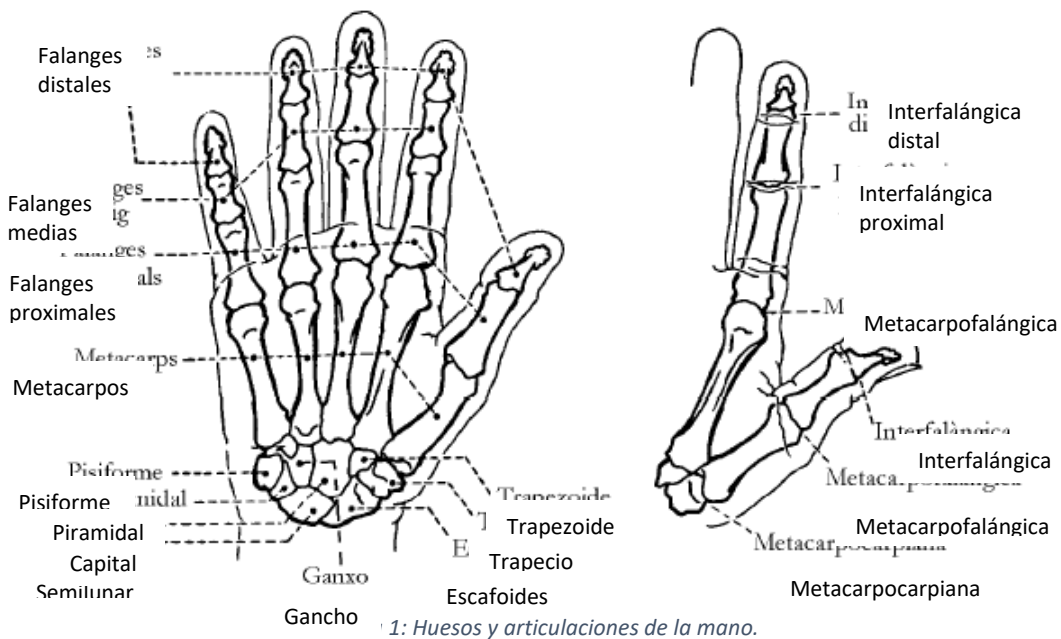
Este proceso incluirá la elección, configuración y programación del microcontrolador y de los distintos elementos que compondrán el sistema de control, así como el diseño y montaje del circuito sobre un PCB. Además, se realizará la integración de este sistema con el sistema mecánico y se llevarán a cabo las pruebas de validación del conjunto.

Finalmente, una vez acabada la etapa de implementación y puesta a punto, se pretende demostrar el funcionamiento y la utilidad de la plataforma mediante la realización de ensayos sobre diferentes manos diseñadas en el grupo de Investigación.

3. ANTECEDENTES

3.1. LA MANO HUMANA

La mayor parte de las interacciones mecánicas con el mundo que nos rodea las realizamos a través de las manos, que nos permiten realizar una gran cantidad de tareas muy diversas, desde aquellas que requieren ejercer fuerzas elevadas como llevar las bolsas de la compra, hasta tareas que demandan poca fuerza pero gran precisión, como puede ser el proceso de escritura. Esta versatilidad es posible gracias a los 23 grados de libertad que permite la compleja constitución de la mano [2], compuesta por un gran número de huesos interconectados a través de distintas articulaciones (ver Figura 1).



El control de los movimientos de la mano se realiza por la acción de dos sistemas de músculos y tendones: los extensores, que permiten abrir la mano; y los flexores, que hacen posible que la mano se cierre. Estos dos sistemas se distribuyen a lo largo de todo el antebrazo y de la mano, formando la musculatura extrínseca y la intrínseca, respectivamente. En líneas generales, se puede afirmar que la musculatura extrínseca es la que posibilita realizar acciones donde predominen la potencia y la velocidad, mientras que la intrínseca proporciona la capacidad de control de los movimientos para poder realizar actividades de precisión.

Al sistema muscular y esquelético hay que sumar el denso sistema nervioso, que además de ser el encargado de controlar los músculos a través de impulsos eléctricos, proporciona los sentidos del tacto y la propiocepción.

3.2. MANOS ARTIFICIALES

Las limitaciones de las manos artificiales para alcanzar las prestaciones de la mano humana se deben principalmente a tres razones:

- 1) Las diferencias mecánicas en cuanto a geometría, grados de libertad de las articulaciones, rangos de movimiento y rigidez de la cadena cinemática y las zonas de contacto
- 2) La diferencia en cuanto a prestaciones dinámicas y número de los actuadores mecánicos de la mano artificial frente a los músculos de la mano humana.
- 3) La reducida sensorización y la limitación de los sistemas de control de la mano artificial frente al denso sistema nervioso de la mano humana y a la tremenda capacidad del cerebro humano como sistema de control.

La investigación en manos artificiales ha tratado de reducir estas limitaciones, intentando desarrollar diseños cada vez más antropomorfos (ver Figura 2). Fundamentalmente hay dos ámbitos en los que se han realizado esfuerzos por intentar reproducir las capacidades prensiles de la mano humana a través de manipuladores antropomorfos: uno de ellos es el de la robótica y el otro el del diseño de prótesis.

Sin embargo, independientemente del ámbito de investigación, todos los modelos de manos se pueden clasificar en dos tipos según el mecanismo de accionamiento: las manos actuadas por sistemas de barras y aquellas actuadas por tendones.

El paso hacia diseños más antropomorfos se ve restringido, especialmente en el caso de prótesis de mano, por limitaciones espaciales para incrementar el número de motores o actuadores o para incluir un mayor número de sensores, así como por la imposibilidad de los sistemas de control para coordinar un número elevado de grados de libertad.

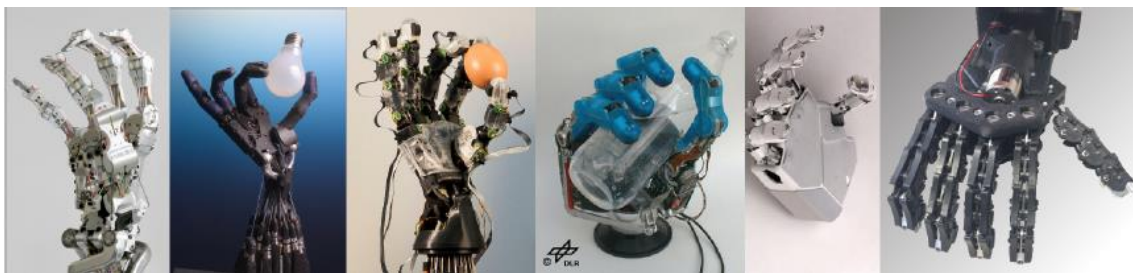


Figura 2: Diferentes modelos de manos robóticas antropomórficas.

Por otra parte, en los últimos diez años los diseños de prótesis más avanzadas han evolucionado hacia modelos más similares a la mano humana (ver Figura 3), mejorando la interacción hombre-máquina. Esto ha sido posible gracias al desarrollo de la tecnología basada en electromiografía (EMG) superficial utilizando los músculos del muñón remanente, a la tecnología electroencefalográfica usando los impulsos eléctricos generados por el cerebro o incluso a técnicas más invasivas como la electroneurografía, que permite acceder directamente a las señales generadas por el sistema nervioso.

Además, la mejora de los métodos de control ha permitido en los últimos años incorporar más dedos y más grados de libertad a las prótesis más modernas, utilizando un control secuencial en el cual sólo uno de los grados de libertad es utilizando en cada instante y se emplean señales clave desde el músculo, el cerebro o el sistema nervioso para pasar de uno a otro grado de libertad. En otros casos se usan métodos más simples, incorporando botones para cambiar el modo de agarre o grado de libertad actuado por los músculos, y en muchos casos el pulgar o la muñeca requieren una acción mecánica con la otra mano para pasar de uno a otro modo de agarre.



Figura 3: Prótesis mioeléctricas: (a) Sensor Hand de Otto Bock, (b) Michelangelo Hand de Otto-Bock, (c) i-Limb Hand de Touch Bionics, (d) BeBionic Hand de RSL Steeper.

En los últimos años, ha crecido la tendencia hacia el desarrollo de manipuladores artificiales de bajo coste, principalmente motivada por el movimiento de desarrollo de las soluciones de código abierto en informática y electrónica (como Arduino), y el por gran desarrollo y accesibilidad de las tecnologías de prototipado rápido (impresión 3D).

Algunos grupos de investigación han dirigido su objetivo a la reducción del coste de los sistemas protésicos utilizando sistemas mecánicos, actuadores y sistemas de control fácilmente accesibles de forma comercial, incidiendo en cubrir las necesidades básicas de agarre.

La figura 4 muestra algunos ejemplos de manos protésicas de bajo coste, la mayor parte de las cuales son actuadas por tendones que provocan la flexión de los dedos a partir del giro de la muñeca o del codo, dependiendo del nivel de la amputación del paciente.

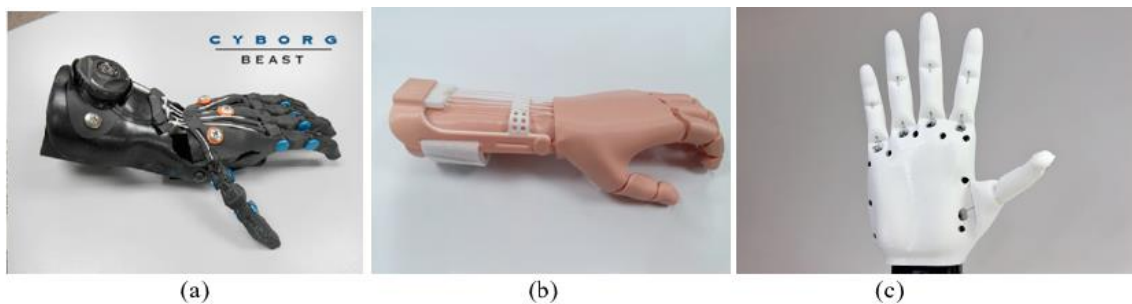


Figura 4: Prótesis de bajo coste realizadas por impresión 3D: (a) Cyborg beast, (b) Flexy-Hand 2 (c) Ada Hand.

Siguiendo esta tendencia, el grupo de investigación también ha desarrollado sus propias manos de bajo coste. Es el caso de la IMMA Hand [3], una mano accionada por tendones con seis grados de libertad (flexión independiente de cada uno de los cinco dedos y abducción del pulgar) y donde el retorno a la posición natural de extensión se produce gracias a la propia elasticidad de los materiales de impresión (ver Figura 5).

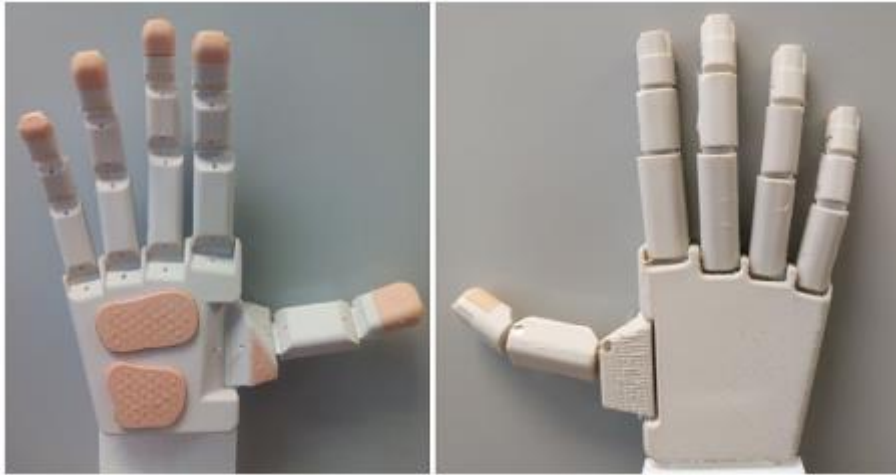


Figura 5: IMMA Hand.

Otra mano desarrollada por el grupo es la BruJa Hand [4], de cinco grados de libertad. En este caso, se desarrollaron tres versiones distintas de la misma mano:

- Modelo B: Inspirada en la TBM Hand, el movimiento es transmitido mediante un mecanismo de barras accionado por un sistema piñón-cremallera (ver Figura 6).
- Modelo T: En este caso, la mano es accionada por un sistema de tendones, donde el retorno se produce gracias a la incorporación de unas gomas elásticas.
- Modelo BT: En realidad, es una combinación de los dos modelos anteriores. En vez de utilizar un sistema piñón-cremallera, las barras del modelo B son movidas por las poleas del modelo T.

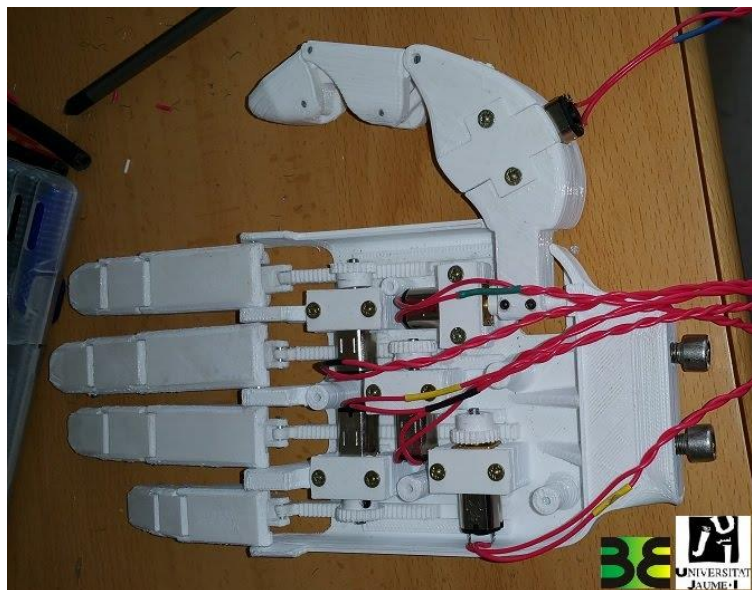


Figura 6: Modelo B de la BruJa Hand.

3.3. EL CONTROL DE MANOS PROTÉSICAS

En el control de manos protésicas, se diferencian dos niveles distintos: el control de alto nivel y el de bajo nivel.

El control de alto nivel se encarga de la comunicación hombre-máquina, tratando de descifrar cual es la intención del usuario. El método más empleado en las prótesis comerciales actuales, como ya se ha mencionado anteriormente, es el de la tecnología EMG. Otras prótesis más sencillas simplemente funcionan con botones para que el usuario pueda elegir el agarre que quiera realizar. Sin embargo, sobre todo en el ámbito de la investigación, otros métodos como la tecnología EEG o la tecnología ENG también son ampliamente utilizados.

Por otra parte, el control de bajo nivel lo constituyen los diferentes algoritmos que permiten al usuario, una vez definido el agarre, el realizar el movimiento de manera correcta y asegurando la sujeción del objeto. Aunque normalmente este proceso es realizado enteramente por la prótesis de manera automática, en algunos casos un control proporcional permite al usuario elegir la velocidad del movimiento de cierre y la fuerza de agarre. En los últimos años se han empezado a incorporar a las manos sensores que permiten a los usuarios recuperar, hasta cierto punto, el sentido del tacto a través de la prótesis.

A la hora de elaborar la arquitectura de control de bajo nivel, hay que tener en cuenta que el proceso de agarre se divide en tres etapas bien diferenciadas:

- La primera etapa es la colocación de la mano en la postura inicial, diferente para cada tipo de agarre.
- La segunda etapa consiste en un control de posición, donde los dedos deben seguir diferentes trayectorias de manera coordinada para pasar de la posición inicial a la posición final de agarre del objeto. Por lo tanto, los diferentes sistemas deben incluir al menos un sensor de posición por cada dedo.
- Finalmente, una vez los dedos han tocado el objeto, se debe empezar un control de fuerza que asegure la estabilidad del agarre. Para poder realizar este control, las manos suelen incorporar algún tipo de sensor que permita conocer el estado de la sujeción del objeto, como son los sensores de presión o los de deslizamiento.

3.4. EL PROYECTO BENCH-HAND

El desarrollo de la plataforma PACMAR es un trabajo que pretende ayudar a cumplir los objetivos del proyecto de investigación BENCH-HAND, que busca desarrollar equipos, protocolos y métricas para la evaluación experimental de manos artificiales y que lleven a la mejora del diseño de manipuladores robóticos y manos protésicas.

A pesar de los nuevos avances en este tipo de tecnología, las manos protésicas siguen estando muy lejos de ser capaces de igualar las capacidades del miembro faltante. En este proyecto se parte de la hipótesis de que, para seguir mejorando en este campo, es necesaria una evaluación experimental para poder evaluar exhaustivamente los diferentes prototipos de estas manos artificiales, y de que dicha evaluación experimental debe desacoplarse para analizar de forma separada los tres principales factores que afectan a la funcionalidad de una mano:

1. El diseño mecánico de la misma (topología, materiales) que condiciona las posturas de agarre estable alcanzables.
2. Las prestaciones dinámicas de sus actuadores o motores y sistemas de transmisión mecánica, que condicionan las prestaciones dinámicas como fuerzas agarre o tiempos de apertura/cierre.
3. El sistema de control de la mano, que condiciona la propiocepción, sensibilidad, rapidez de respuesta o versatilidad para diferentes tareas.

Asimismo, se parte de la hipótesis de que las métricas experimentales que permitan evaluar los prototipos de mano según estos tres factores deben basarse en la comparación con las prestaciones de la mano humana. Por tanto, el proyecto se plantea tres objetivos:

1. Desarrollar equipos y protocolos de ensayo (*benchmarks*) que permitan evaluar experimentalmente cualquier mano artificial y compararla con la mano humana mediante métricas definidas en los tres niveles citados (diseño mecánico, actuación, control).
2. Obtener un diseño mejorado de una mano robótica para aplicaciones de servicio, utilizando las metodologías desarrolladas en el objetivo 1 en sus tres niveles.
3. Obtener un diseño mejorado de una prótesis de mano transradial motorizada de bajo coste, empleando las metodologías desarrolladas en el objetivo 1 en sus tres niveles.

3.5. ENSAYOS DE FUNCIONALIDAD DE MANOS

En rehabilitación, la evaluación de la funcionalidad de la mano humana se limita en muchos casos a medidas con instrumentos específicos para conocer la fuerza máxima de agarre o de pinzado. Estos datos pueden resultar útiles, pero no recogen la variedad de actividades de agarre que realiza la mano en actividades de la vida diaria (AVD). Por ello, se han definido diferentes protocolos en el ámbito de rehabilitación del miembro superior que utilizan objetos para simular la realización de AVD y que podrían servir de referencia también como protocolos de evaluación de la funcionalidad de una mano artificial. Entre ellos se encuentran el test “Box and Blocks” [5], el test de Sollerman [6], o el “Action Arm Research Test” [7].

La mayor parte de estos tests consisten en la realización de actividades específicas de agarre, relacionadas con las AVD. Sin embargo, la evaluación suele hacerse usando cuestionarios de autoevaluación rellenos por el paciente o por valoración observacional, con lo que no sirven para definir una métrica de la capacidad de agarre objetiva. En cambio, el test SHAP [8], sobre 26 objetos, presenta una mayor objetividad al utilizar el tiempo de ejecución como evaluador y estableciendo una escala o índice de funcionalidad, utilizando datos normalizados de un grupo de control sano sobre 6 tipos de agarre.

Por otra parte, también se han desarrollado algunos protocolos para evaluar la funcionalidad de prótesis de mano. Un trabajo relativamente reciente (Lindner et al., 2010) [9] analiza las diferentes métricas publicadas para evaluar la funcionalidad de prótesis del miembro superior, relacionándolas con la clasificación internacional del funcionamiento, de la discapacidad y la salud (ICF), seleccionando aquellas cuya validez estadística ha sido estudiada y publicada.

Sin embargo, los aspectos relacionados con los grupos d43 (lifting and carrying objects), d44 (fine hand use) y algunos de los grupos d5 (self care) y d6 (domestic life) de la ICF, son los más interesantes en este contexto. Algunos de los más significativos en este sentido son OPUS [10], ACMC [11] y UBET (para niños) [12].

Por otra parte, todos estos protocolos citados anteriormente están pensados para evaluar manos robóticas o protésicas con sus sistemas de actuación y control incorporados. Una publicación del propio grupo de investigación de Biomecánica y Ergonomía de la UJI busca subsanar este problema al desarrollar su propio protocolo y el dispositivo ABA (able-bodied adaptator) [13], que permite operar cualquier mano artificial actuada por tendón manualmente (ver Figura 7), eliminando la influencia en el resultado del factor de control.

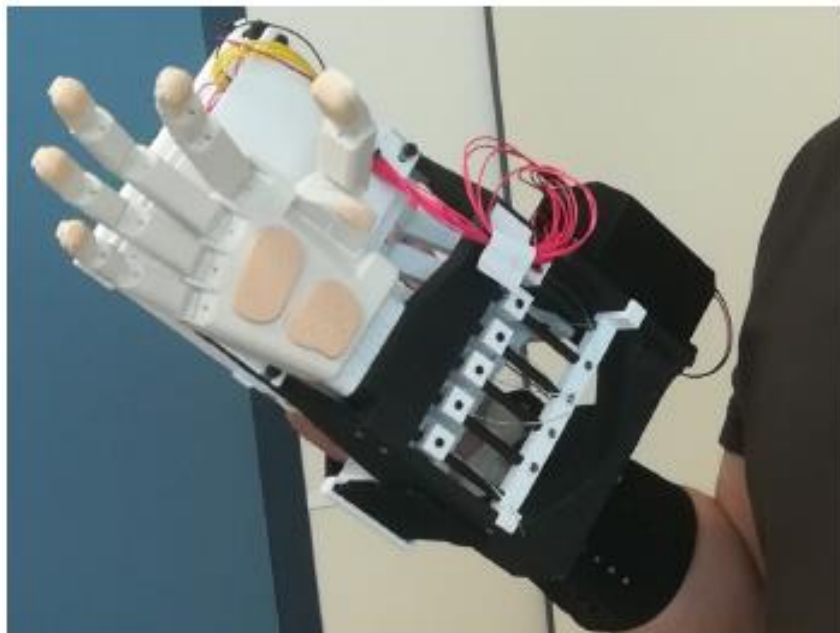


Figura 7: IMMA Hand y dispositivo ABA.

Para el protocolo de evaluación, se han seleccionado 24 objetos de los 73 que componen el *Yale-CMU-Berkeley Object and Model Set* [14]. Estos 24 objetos se dividen en ocho grupos de tres objetos, donde cada grupo se corresponde con uno de los 8 principales agarres de la vida diaria (ver Figura 8).



Figura 8: Tipos de agarre y objetos utilizados en el protocolo.

4. REQUISITOS DE DISEÑO

Con el fin de poder realizar los ensayos, la plataforma debe asegurar la fijación de las diversas manos independientemente de su diseño mecánico, permitiendo al mismo tiempo la ejecución de protocolos de ensayo sobre diferentes conjuntos de objetos y según los principales agarres de la vida cotidiana.

Debido a la naturaleza de estos ensayos y a la gran variedad de diseños de manos existentes, la plataforma debe responder a una serie de especificaciones a nivel del sistema estructural:

1. Permitir la independencia de la zona donde se ubica la mano y los “gadchets” para los diferentes ensayos, respecto a la zona destinada a la mecatrónica.
2. Permitir modificar las posiciones de la mano en las 3 dimensiones, así como la orientación de la muñeca en los diferentes agarres.
3. Permitir el montaje de manos que lleven la mecatrónica embebida en la mano o separada en el antebrazo.
4. Ser flexible y versátil a la hora de implementar nuevos ensayos que se puedan requerir.
5. Ser suficientemente resistente y fácil de transportar.
6. Ser fácilmente reproducible por otros grupos de investigación para su uso como herramienta.

En cuanto al sistema de control, éste debe:

1. Permitir el manejo de los diferentes tipos de manos para realizar los ocho principales agarres de la vida cotidiana y sobre el subconjunto de 24 objetos del YCB Set. En un principio, se trabajará con las manos IMMA Hand y BruJa Hand.
2. Para poder manejar tanto la IMMA Hand como la BruJa Hand, el sistema debe implementar motores pequeños y ligeros, pero suficientemente potentes como poder mover los dedos de las manos.
3. Ya que se pueden encontrar desde manos que funcionan con solamente dos motores (uno para el pulgar y otro para el resto de los dedos) hasta manos que utilizan seis motores (dos para el pulgar y uno para cada uno del resto de dedos), el sistema deberá tener capacidad de manejar al menos seis motores.

4. Incluir los algoritmos de control y los sensores necesarios para asegurar el correcto desempeño de las manos en las tres etapas distintas del proceso de agarre. El sistema debe incluir al menos un sensor de posición y uno de fuerza por cada dedo.
5. Se requiere poder tratar en tiempo real (tiempo total de reacción máximo del sistema de 30 ms) toda la información de los múltiples sensores a la hora de ejecutar los algoritmos de control avanzados. Para ello, se deberán implementar algoritmos lo suficientemente rápidos y utilizar un controlador con la potencia y velocidad de procesamiento suficientes.
6. Por último, hay que tener en cuenta que el sistema de control debe incorporar los elementos necesarios para poder incluir en un futuro el control de alto nivel, permitiendo a un usuario real de mano protésica el poder seleccionar el agarre deseado y llevarlo a cabo de manera intuitiva.

5. METODOLOGÍA

5.1. HERRAMIENTA DE DISEÑO DE CIRCUITOS EAGLE V. 9.3

EAGLE (siglas de **E**asily **A**pplicable **G**raphical **L**ayout **E**ditor) es un programa de diseño de circuitos y PCBs desarrollado por CadSoft y Autodesk. Además de ser sencillo de usar y potente, EAGLE tiene una gran cantidad de bibliotecas de componentes y permite al usuario el diseñar sus propias librerías en el caso de que los dispositivos a utilizar no se encuentren en las librerías predefinidas [15] [16] [17].

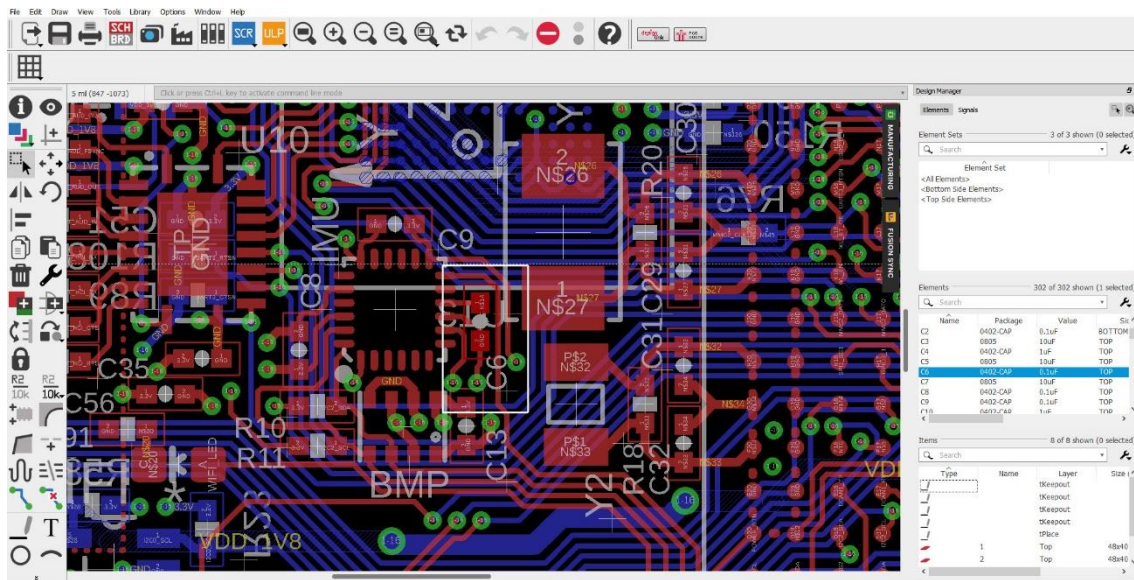


Figura 9: Ejemplo de diseño de un circuito en EAGLE.

Por otra parte, EAGLE dispone de una guía online detallada que describe paso a paso los procesos a seguir para elaborar tanto el diseño esquemático de los circuitos como el diseño de las PCBs [18] [19] [20].

Por último, aunque en principio el software es de pago, dispone de varias versiones gratuitas cuya principal limitación se reduce al tamaño máximo de la placa a imprimir.

5.2. HERRAMIENTA DE PROGRAMACIÓN LABVIEW 2018

LabVIEW es el software que National Instruments provee para la configuración y programación de sus microcontroladores y otras plataformas (ver Figura 10). El lenguaje de programación que utiliza está basado en la programación gráfica del tipo FBD (Function Block Diagram), y aunque no siempre es intuitiva, es muy potente y además permite la programación de tareas en paralelo. Además, en internet se pueden encontrar una gran cantidad de tutoriales y recursos que facilitan la programación en este lenguaje.

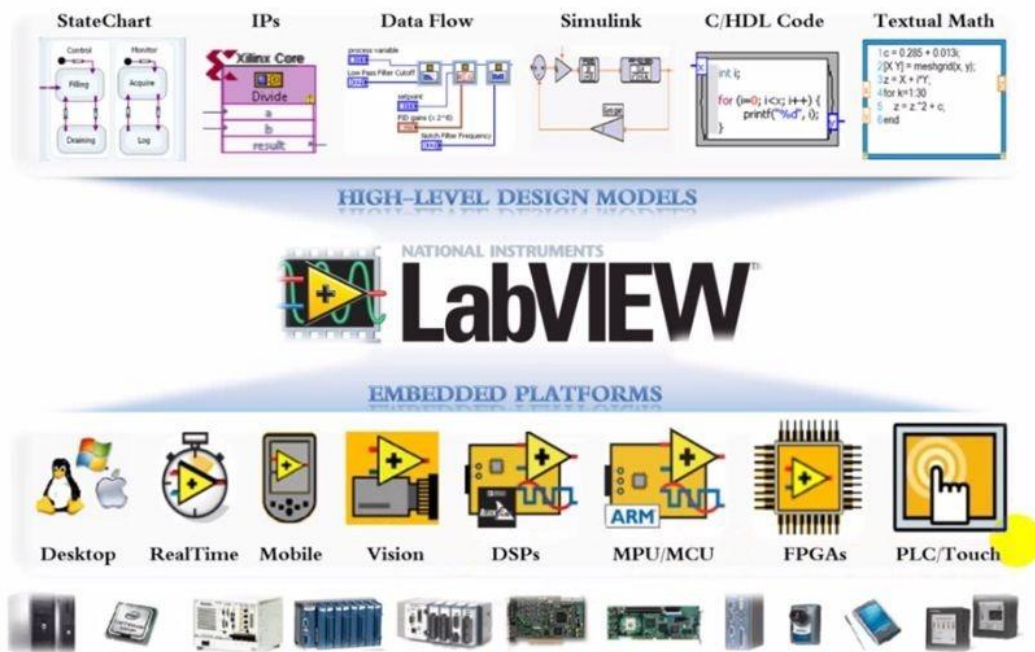


Figura 10: Entornos de programación y plataformas de desarrollo en LabVIEW.

Sin embargo, cabe precisar que antes de poder programar un microcontrolador el proceso de instalación y configuración del software puede ser complicado y largo, ya que hay que instalar el siguiente conjunto de aplicaciones en el orden concreto en el que se presentan a continuación [21]:

1º) **NI LabVIEW:** Como se ha mencionado anteriormente, LabVIEW es un programa de desarrollo de sistemas para las aplicaciones de test, medida y control de los dispositivos de National Instruments.

2º) **LabVIEW Real-Time Module:** Permite compilar y optimizar el código LabVIEW para que se ejecute en tiempo real sobre los microcontroladores de NI.

3º) **LabVIEW FPGA Module:** Extiende LabVIEW a la funcionalidad de programación FPGA (Field-Programmable Gate arrays) sobre los microcontroladores de NI.

4º) **NI-RIO Drivers:** Estos drivers se utilizan para la implementación de aplicaciones embebidas programadas en LabVIEW para los microcontroladores de NI.

5.3. HERRAMIENTA CAD SOLIDWORKS

Tanto la IMMA Hand y la BruJa Hand como el sistema estructural de la PACMAR han sido diseñados en **SolidWorks 2018**. SolidWorks es un programa de pago para el diseño mecánico por ordenador, que permite el montaje de ensamblajes de diferentes piezas y la exportación de los modelos a formato STEP, que es el formato utilizado por las impresoras 3D. Además, SolidWorks también dispone de la funcionalidad de creación de planos para aquellas piezas que los requieran para su fabricación.

5.4. EQUIPOS DE MEDICIÓN

Para la comprobación del buen funcionamiento de los componentes electrónicos y del estado de las conexiones del circuito, se ha utilizado el **multímetro digital VC830L** de Sparkfun ELECTRONICS.

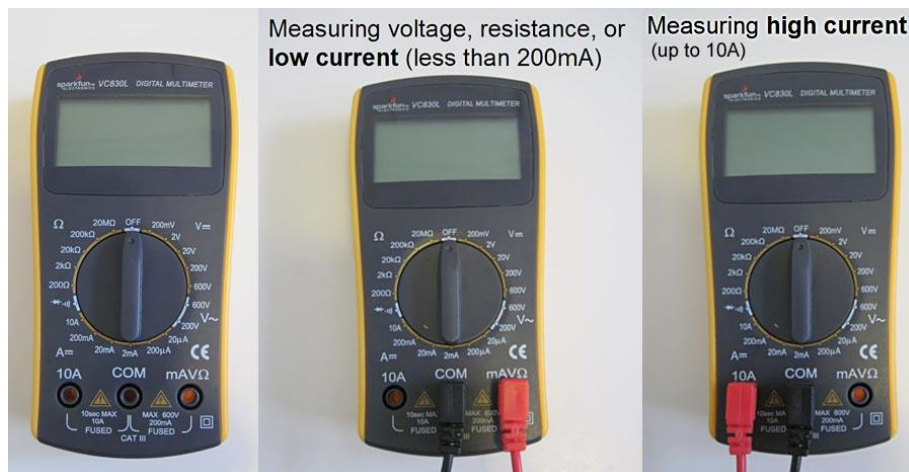


Figura 11: Conexión de los cables de medida para el multímetro VC830L.

Este multímetro permite conocer los valores eficaces de los voltajes y corrientes medidos, así como de las resistencias presentes en el circuito. Además, también se puede comprobar si existen cortocircuitos o si por el contrario hay algún mal contacto.

Sin embargo, en ocasiones es necesario conocer la forma temporal de las señales eléctricas. Para estos casos, se puede utilizar el **osciloscopio digital TBS 1052B-EDU** de la marca Tektronix.

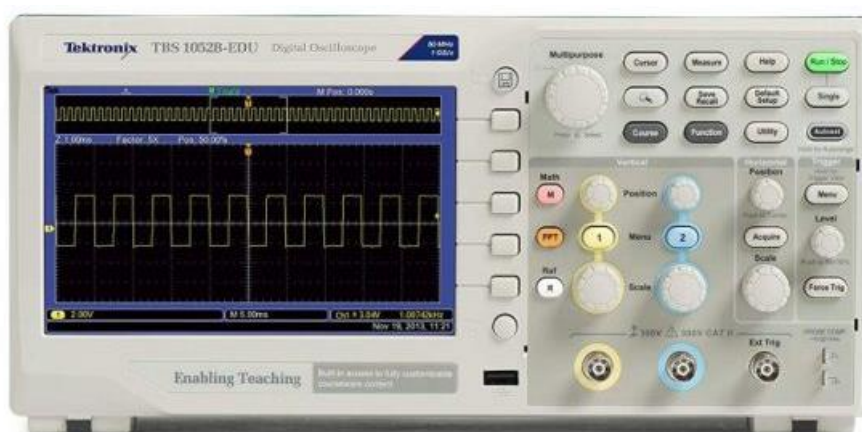


Figura 12: Osciloscopio digital TBS 1052B-EDU.

6. ANÁLISIS DE SOLUCIONES

6.1. MOTORES

Se han considerado tres tipos diferentes de motores que cumplieran los requisitos de tamaño, peso y potencia: los motores de corriente continua, los motores paso a paso y los servomotores.

6.1.1. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

Los motores de corriente continua se componen principalmente de una carcasa con un imán permanente y un colector segmentado que se encarga de alimentar la bobina que va enrollada alrededor del eje. La corriente que circula por el conmutador se invierte de sentido cada media vuelta del rotor, de manera que el campo magnético que se induce en la bobina provoque siempre repulsión con el imán permanente fijado en la carcasa. Así, el motor puede permanecer girando mientras se mantenga la corriente que circula por el electroimán.

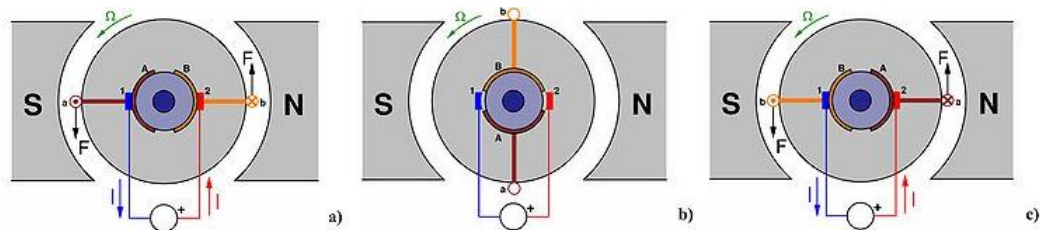


Figura 13: Esquema del funcionamiento de un motor de c.c. de dos polos.

6.1.2. MOTORES PASO A PASO

En el caso de los motores paso a paso, es el rotor el que está constituido de un imán permanente, y el estátor contiene dos grupos de bobinas.

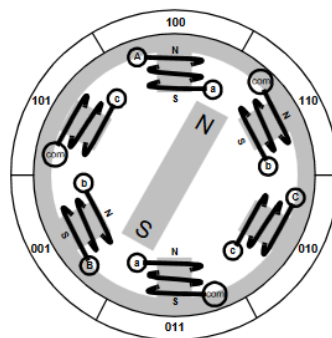


Figura 14: Esquema de la estructura interna de un motor paso a paso.

Para poder girar, las bobinas son alimentadas una a una en una dirección determinada y luego en la opuesta. Así, el campo magnético introducido por las bobinas hace girar al rotor, que pasa de una a otra de las cuatro posiciones estables si se usa un paso completo o pasa por ocho posiciones distintas si se utiliza medio paso.

Estos motores pueden ser bipolares o unipolares. La diferencia principal es que los motores paso a paso bipolares requieren de una inversión del sentido de la corriente, mientras que en el caso de los motores unipolares no es necesario.

6.1.3. SERVOMOTORES

Los servomotores son motores de corriente continua que permiten obtener una respuesta precisa gracias a que ya incluyen un sensor de posición angular y el circuito necesario de interfase para su control directo.

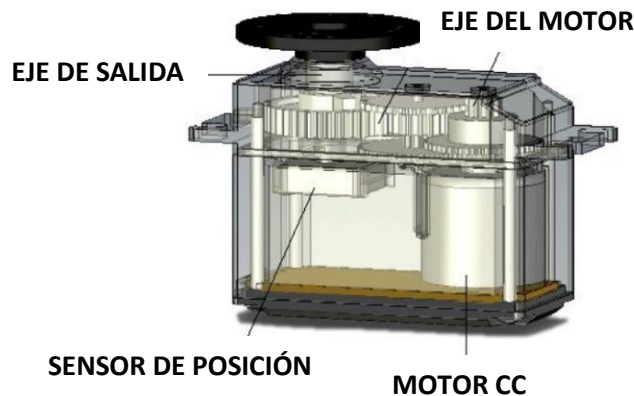


Figura 15: Esquema de la estructura interna de un servomotor.

6.1.4. COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES

Para la elección de los motores, se ha recurrido a un estudio previo realizado en el propio grupo de biomecánica (Delphine Lavignasse, 2018) [22] en el que se comparaba la fuerza que podían ejercer diferentes motores a la hora de cerrar el dedo índice del modelo de mano artificial Flexy-Hand, actuada por tendón, en tres posiciones distintas:



Figura 16: Las tres posiciones del dedo para obtener la medida de fuerza.

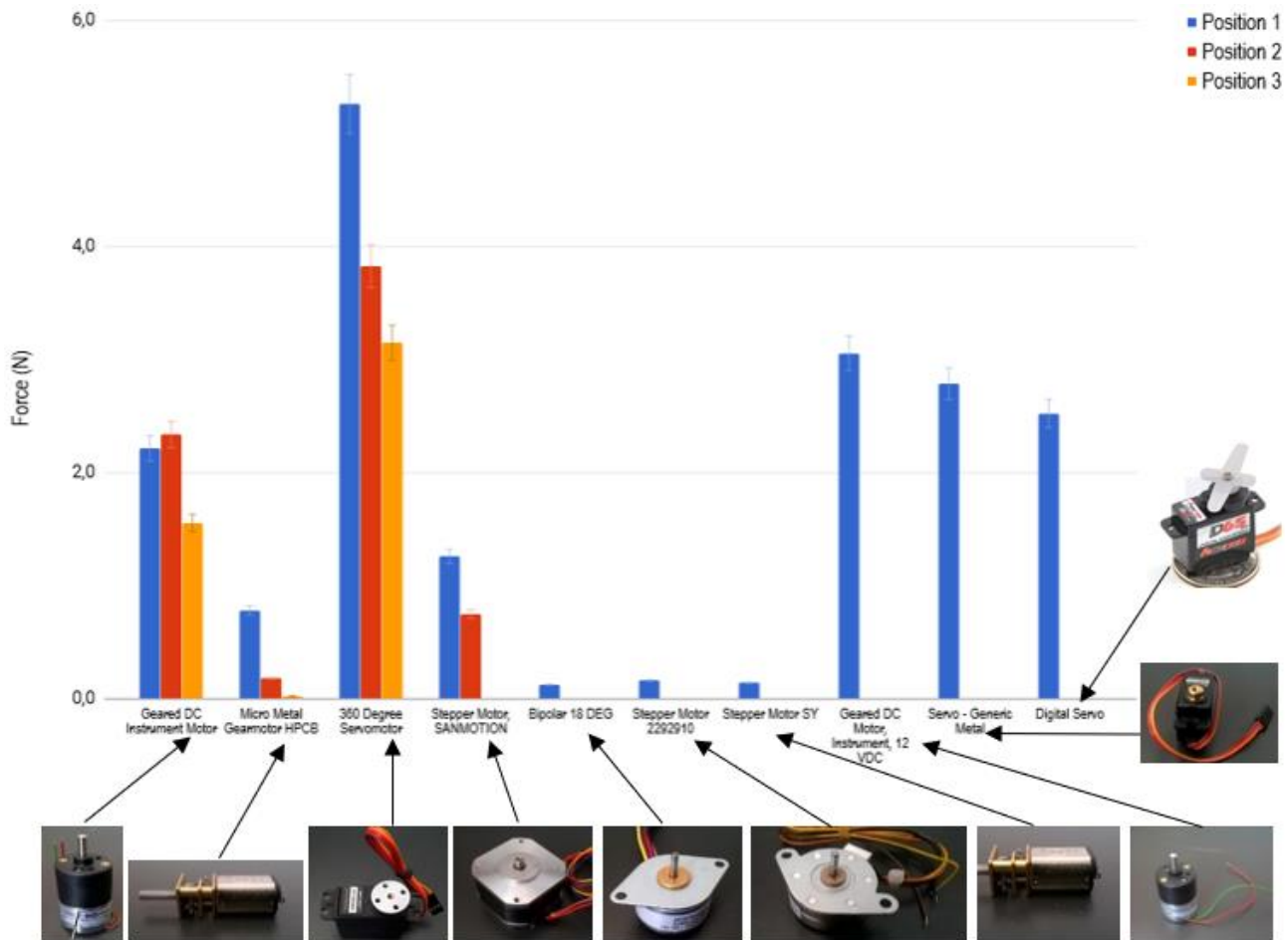


Figura 17: Gráfica comparativa de la fuerza ejercida por los diferentes motores para las tres posiciones del índice.

Cómo se puede observar en la gráfica precedente, de los 10 tipos diferentes de motores ensayados, sólo 3 fueron capaces de ejercer una cierta fuerza en cada una de las 3 posiciones del dedo. De entre estos tres motores, el de menor peso y tamaño es el micromotor de corriente continua HPCB, mientras que el más potente es el servomotor.

6.2. SENSORES PARA EL CONTROL DE POSICIÓN

6.2.1. ENCODERS ROTATIVOS

Los *encoders* rotativos son sensores que permiten conocer la posición angular del eje de un motor gracias al giro de un disco que es solidario al mismo eje. Estos sensores pueden ser incrementales o absolutos, de uno o dos canales y magnéticos u ópticos.

La principal diferencia entre los sensores incrementales y absolutos es el tipo del disco. El *encoder* absoluto utiliza un disco compuesto por varios anillos concéntricos, cada uno con un patrón diferente. La lectura simultánea de las señales generadas por cada anillo con un escáner radial permite conocer la orientación del eje de rotación con exactitud.

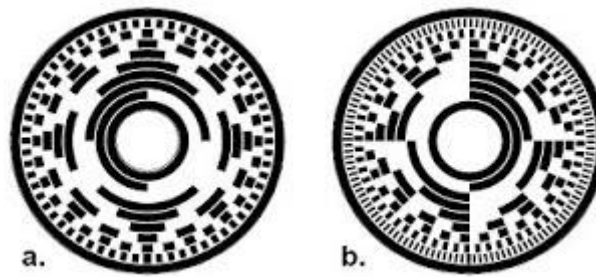


Figura 18: Disco de un encoder rotativo absoluto.

El funcionamiento de los *encoders* incrementales es bastante más simple. Un disco básico de *encoder* incremental de dos canales tiene sólo dos anillos, de manera que se obtienen dos señales desfasadas de 90 grados, lo que equivale a un cuarto de periodo. En consecuencia, según el nombre de impulsiones se puede conocer el número de vueltas dadas por el motor; y según la señal que se reciba antes, se puede determinar el sentido de rotación.

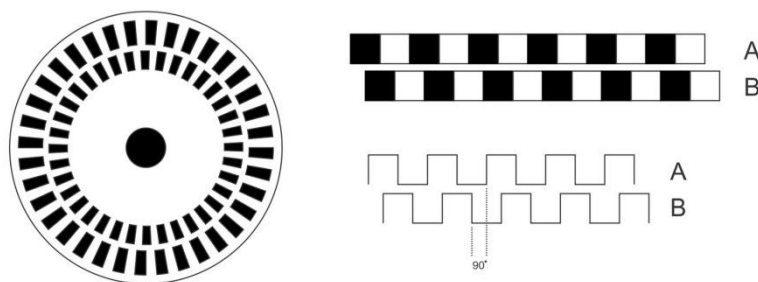


Figura 19: Disco de un encoder rotativo incremental.

La principal ventaja de un *encoder* absoluto es que se puede conocer en todo momento la posición exacta del eje. Además, son los más precisos. Sin embargo, los *encoders* incrementales son bastante menos caros, y la implementación de un fin de carrera (como por ejemplo, un interruptor) que marque una posición de partida permite conocer también la posición absoluta del eje.

Por otra parte, la diferencia entre los sensores ópticos y magnéticos es la tecnología utilizada para leer los patrones de los discos. En un *encoder* óptico el disco está compuesto de zonas contiguas transparentes y opacas, y está situado entre una fuente de luz y un sensor óptico. De esta manera, cuando el disco y el motor giran, los segmentos opacos bloquean la luz y los transparentes la dejan pasar, generando la señal digital.

Sin embargo, en el caso de los *encoders* magnéticos, estos se basan en el uso de sensores de efecto Hall, donde el disco acoplado al eje de rotación presenta una serie de polos a lo largo de su circunferencia. Así, conforme el disco gira, el cambio de un polo a otro induce una tensión en los sensores de tipo Hall, que el circuito de acondicionamiento transforma en un pulso digital.

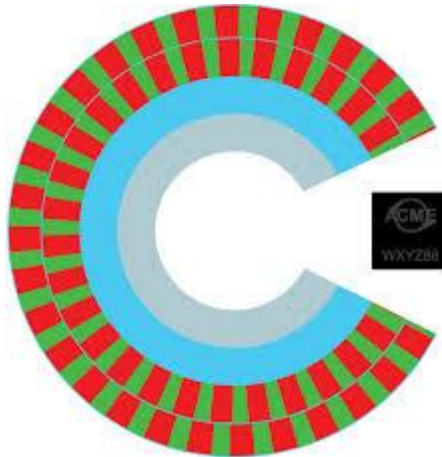


Figura 20: Disco de un encoder magnético de dos canales.

Estos *encoders* presentan varias ventajas frente a los *encoders* ópticos clásicos: se consiguen resoluciones más altas, su instalación y uso es más flexible y fácil y no se produce desgaste debido a que no hay rozamiento entre los discos y el eje.

6.2.2. SENSORES DE FLEXIÓN

Los sensores de flexión son elementos que presentan una resistencia variable en función del nivel de deformación angular sufrido.



Figura 21: Sensor de flexión.

Para obtener medidas basadas en voltaje, estos sensores suelen utilizarse en montajes de divisor de tensión. Un ejemplo de circuito de adaptación del sensor sería el siguiente:

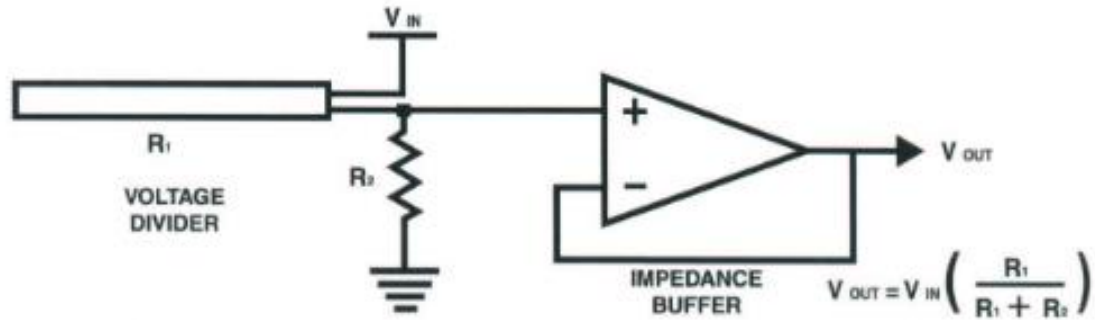


Figura 22: Circuito básico de interfase del sensor de flexión.

Como se puede observar en la imagen precedente, el voltaje de salida del operacional es proporcional al voltaje de alimentación del sensor y al valor de la resistencia del sensor de flexión.

Estos sensores presentan varias complicaciones: su dificultad de implementación, el hecho de que presentan una cierta falta de linealidad y la aparición de histéresis, que provoca que la medida para un mismo ángulo de flexión dependa del ángulo precedente (ver Figura 23).

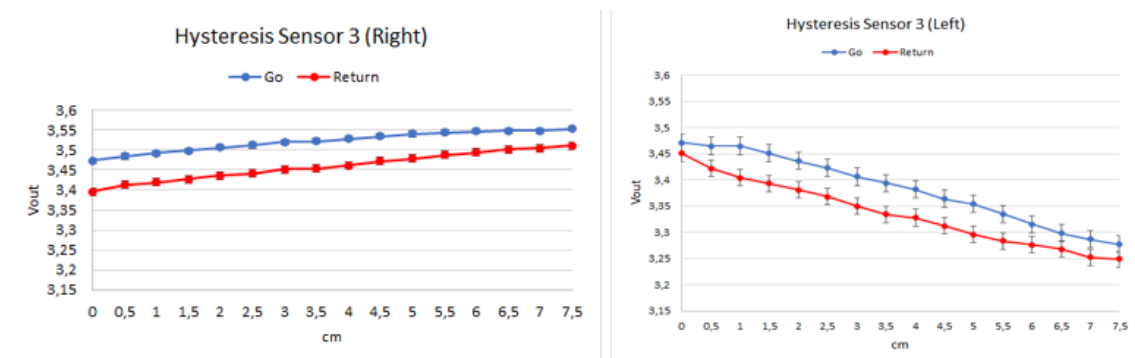


Figura 23: Gráficos representando la histéresis de los sensores de flexión al girarlos tanto a derecha como a izquierda.

6.3. SENSORES PARA EL CONTROL DE FUERZA

6.3.1. SENSORES DE PRESIÓN

Una de las opciones para el control de la fuerza en el agarre realizado por manos protésicas es el uso de conjuntos de sensores de presión distribuidos a lo largo de toda la superficie de la mano.

A lo largo de los años, numerosos estudios han publicado una gran variedad de sensores de presión en función de la tecnología utilizada para obtener la señal de medida, incluyendo sensores resistivos, capacitivos, piezoeléctricos, ópticos, etc. En la figura siguiente se pueden ver algunos ejemplos de los sensores de presión más utilizados en el ámbito de las manos protésicas.

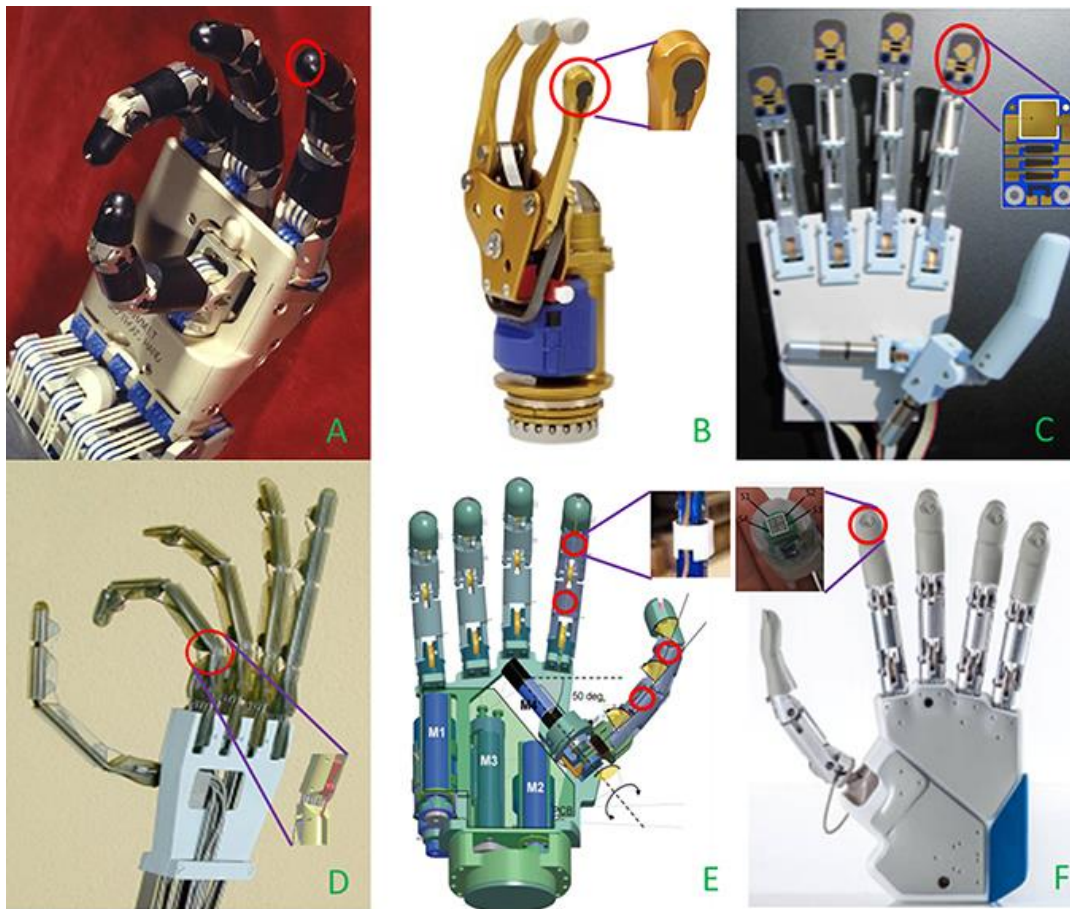


Figura 24: Ejemplos de aplicación de sensores de presión en diferentes manos protésicas.

Estos sensores deben presentar una gran sensibilidad para detectar pequeñas variaciones en la fuerza de contacto, así como una gran flexibilidad y adaptabilidad a la forma del objeto a agarrar. Algunos de los principales problemas que presenta el uso de este tipo de sensores son la complejidad de montaje, el gran número de conexiones necesarias y la dificultad del tratamiento de todas las señales recibidas en los algoritmos de control de fuerza.

6.3.2. SENSORES DE CORRIENTE

Los sensores de corriente de efecto Hall permiten obtener una medida en voltaje proporcional a la corriente que circula por el motor gracias al campo magnético inducido, tal y como muestra la figura siguiente:

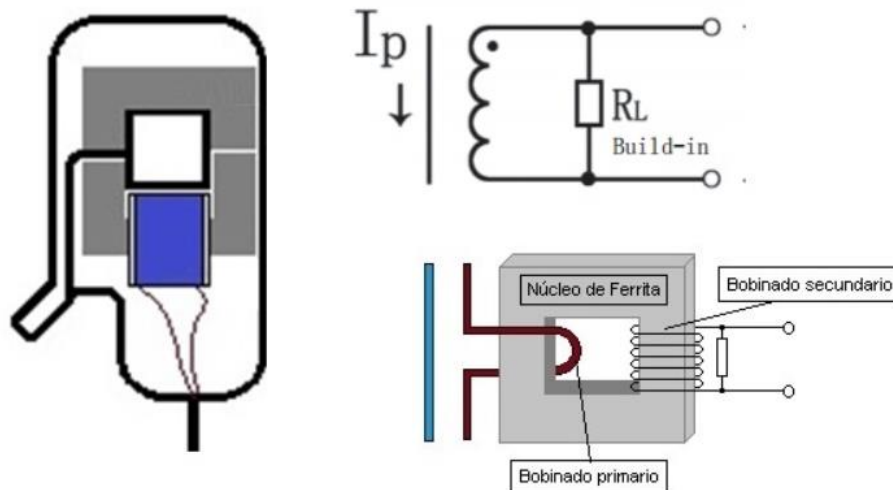


Figura 25: Esquema de funcionamiento de un sensor de corriente a efecto Hall.

La idea detrás para el uso de estos sensores es conectarlos en serie con el motor, de manera que proporcionen información indirecta sobre la fuerza ejercida por las manos en el agarre. Esto es posible ya que la fuerza de cierre de los dedos depende del par motor, y se sabe que el motor demanda más corriente cuando necesita aumentar el par.

El principal problema que presentan estos sensores es su tamaño, que dificulta su instalación en las manos. Sin embargo, son fáciles de implementar y se pueden instalar en un circuito externo a las manos si éstas no disponen del espacio suficiente.

6.3.3. SENSORES DE PAR

Los sensores de par utilizados en manos protésicas suelen consistir en galgas extensiométricas, que se instalan en los ejes de las articulaciones de los dedos. De esta manera, cuando el dedo se mueve ejerce una fuerza que deforma la galga. Ésta varía entonces su resistencia, lo que permite convertir una variación de fuerza en una variación de voltaje.

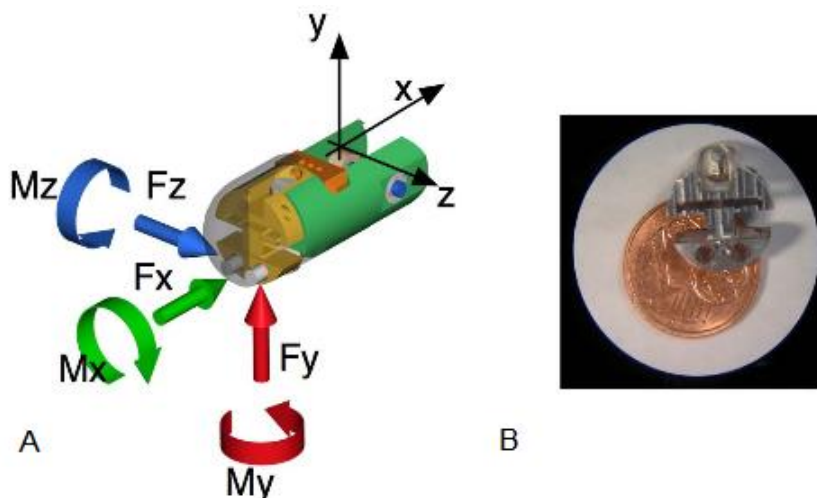


Figura 26: Sensor miniaturizado para instalación en manos protésicas.

6.3.4. SENSORES DE DESLIZAMIENTO

Los sensores de deslizamiento se basan en la medición de las vibraciones y las fuerzas tangenciales que se producen en un agarre en el momento en el que un objeto empieza a deslizarse. Para obtener información sobre estos parámetros, existen diferentes tecnologías basadas en elementos resistivos, ópticos, piezoeléctricos, sonoros, etc.

Unos de los sensores de deslizamiento más utilizados en diferentes estudios sobre manos artificiales hacen uso de uno o varios sensores de centro de presión que se introducen entre dos capas de películas conductoras. Estas películas presentan electrodos en sus extremos, de manera que se puede conocer el punto de aplicación de la distribución de cargas en función de la diferencia de potencial entre los electrodos.

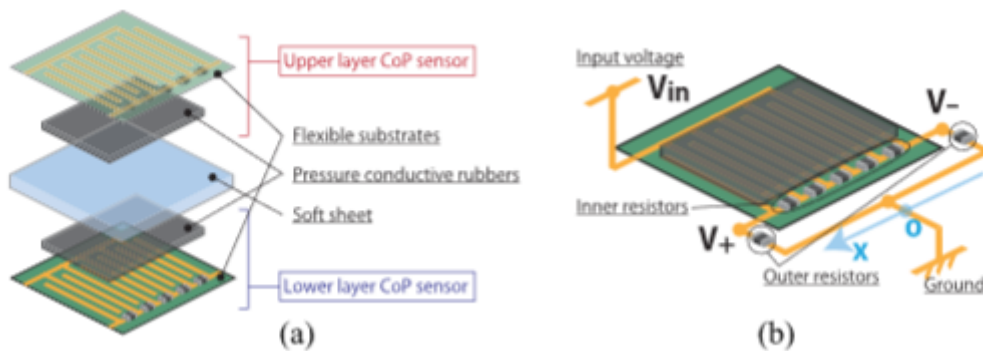


Figura 27: Composición de un sensor de deslizamiento (izq.) y diagrama de conexión del mismo (der.).

Estos sensores permiten reconocer la aparición de una fuerza tangencial a partir de la medición de la diferencia de posición entre los centros de presión de una y otra capa, tal y como se muestra en la siguiente figura:

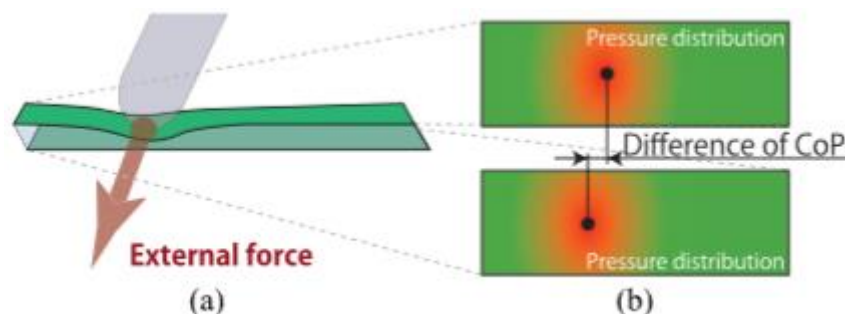


Figura 28: Condición de carga con fuerza normal y tangencial (izq.) y aparición de la diferencia entre los centros de presión (der.).

El problema de este tipo de sensores es que aún se encuentran en una etapa experimental, y no existen todavía estudios que demuestren su viabilidad para llevar a cabo el control de fuerza en tiempo real de prótesis.

6.4. PROCESADOR

6.4.1. ARDUINO MEGA

Arduino MEGA es uno de los microprocesadores de Arduino más completos, con 54 puertos digitales (15 compatibles con PWM), 16 puertos analógicos y un procesador de 16 MHz. Por otra parte, presenta una entrada de alimentación de tipo Jack a 12V y una entrada USB para la comunicación con el ordenador.

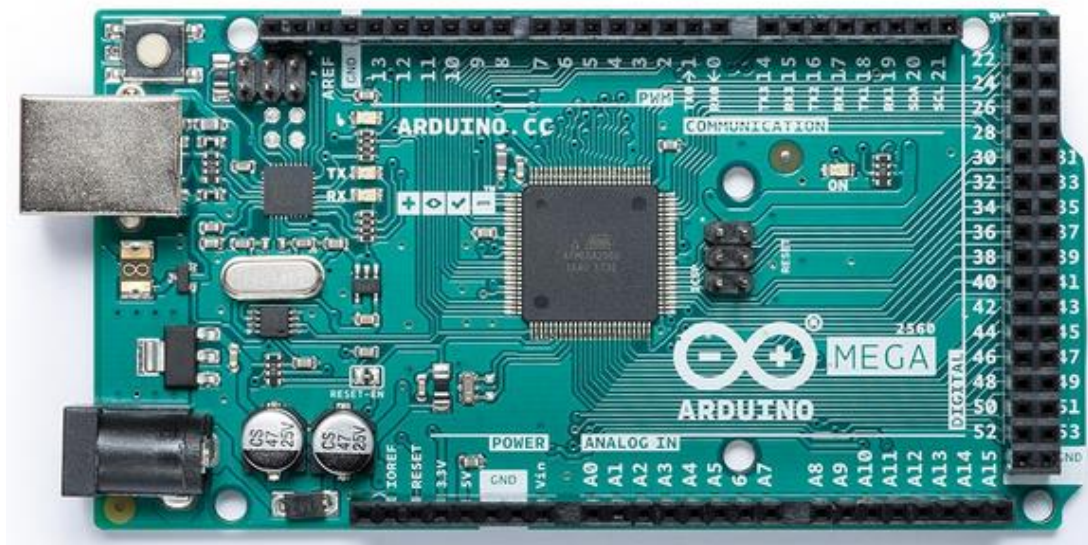


Figura 29: Arduino MEGA 2560.

Su herramienta de programación, llamada Arduino IDE, es gratuita y está basada en el lenguaje C. Con el interés añadido de que en Internet se pueden encontrar una gran cantidad de tutoriales y librerías que facilitan la elaboración del programa.

Las principales ventajas de este controlador son su bajo coste, su reducido tamaño y su simplicidad de uso. Sin embargo, es menos potente que los microprocesadores industriales, no permite la ejecución de tareas en paralelo, lo que puede ser muy útil en el control y no dispone de mucha memoria de almacenamiento, lo que puede suponer un problema a la hora de compilar programas complejos.

6.4.2. COMPACTRIO

Este sistema, de National Instruments, incluye cuatro núcleos de 1.6 GHz con 4 GB de RAM, lo que permite la ejecución de programas en paralelo y garantiza la potencia de cálculo suficiente como para implementar los algoritmos de control más complejos en tiempo real. El hecho de que el controlador sea modular con hasta 8 slots disponibles, permite escoger los periféricos a incluir en el sistema en función de la aplicación.

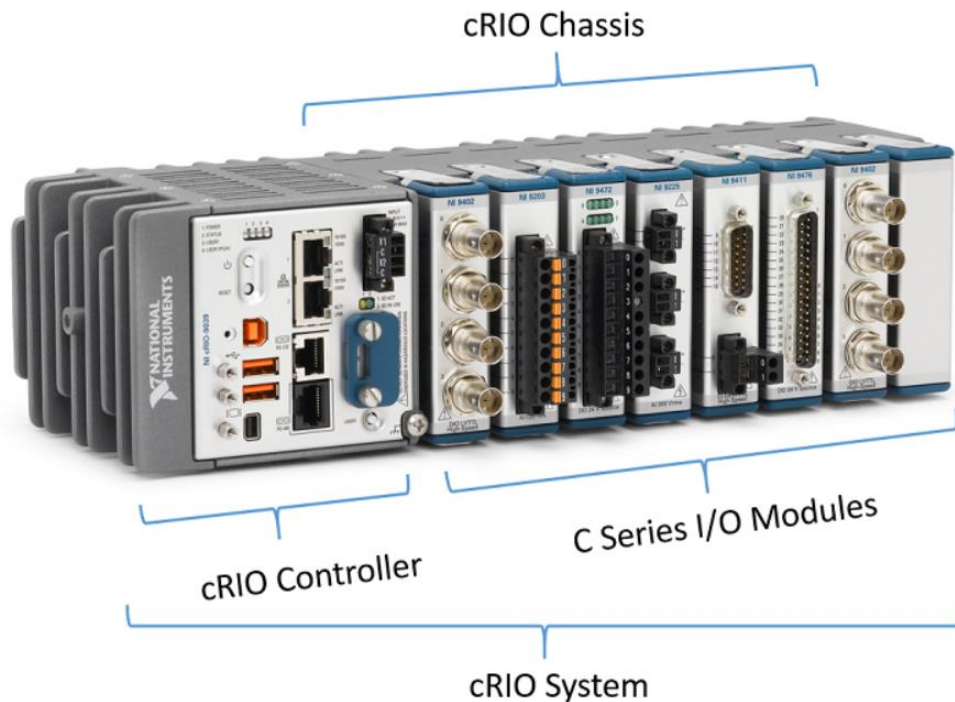


Figura 30: Sistema CompactRIO de National Instruments.

En cuanto a la alimentación del CompactRIO, ésta se tiene que cablear directamente a una fuente externa de alimentación. Por otra parte, la comunicación con el ordenador se puede hacer tanto por USB como por cable de red.

Las principales ventajas de este controlador son su gran potencia de procesamiento y su modularidad, si bien es cierto que presenta un alto coste y es bastante grande y pesado. Se debe considerar que su entorno de programación gráfico, LabVIEW, es específico de National Instruments. Esto dificulta el proceso de desarrollo de aplicaciones, si bien es cierto que la empresa ofrece un buen servicio de soporte y existen una gran cantidad de guías detalladas y tutoriales.

6.5. INTEGRACIÓN DE LOS DIFERENTES COMPONENTES

6.5.1. MONTAJE MANUAL CON PCB PERFORADO

La primera opción barajada para realizar la integración de los diferentes componentes electrónicos de la plataforma es la de utilizar placas de prototipado perforadas y soldar los diferentes componentes manualmente.



Figura 31: Placas de PCB perforado.

Aunque esta opción es la más rápida de implementar, presenta como principales inconvenientes la falta de robustez de las conexiones y la dificultad de mantenimiento del circuito.

6.5.2. IMPRESIÓN POR FOTOLITO USANDO PCB CON CAPA FOTORESISTENTE

Una de las opciones más comunes a la hora de imprimir tus propios diseños de circuitos es la impresión por fotolito usando placas de cobre recubiertas con una película de fibra de vidrio fotorresistente.

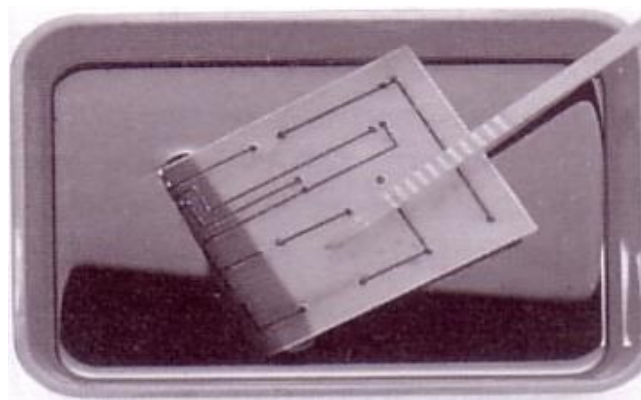


Figura 32: Inmersión de la placa en ácido para eliminar el cobre sobrante tras exposición a la insoladora usando fotolito.

De entre todas las técnicas disponibles para la realización de circuitos impresos, ésta es una de las más rápidas y asequibles para la realización de circuitos individuales. Todo lo que necesita el fabricante es el negativo del circuito diseñado para poder imprimir el fotolito. Sin embargo, cabe mencionar que los agujeros para introducir los componentes y las soldaduras se deben realizar manualmente.

6.5.3. IMPRESIÓN CON FRESADORA

Otra de las opciones para realizar circuitos impresos es la de mecanizar la placa utilizando una fresadora.



Figura 33: Fresadora industrial para la impresión de PCBs.

Las principales ventajas que presenta este método es que permite automatizar el proceso de impresión de placas, lo que permite reducir los costes y tiempos de fabricación de lotes, y que no se necesita recurrir al uso de químicos. A diferencia de la técnica anterior, ésta permite realizar al mismo tiempo la impresión del circuito y la perforación del mismo.

Sin embargo, para poder utilizar esta técnica de impresión, se tiene que pasar por una etapa intermedia de transformación del diseño gráfico al código CNC, que es el que utilizan las fresadoras. Este problema lo resuelven algunos programas de diseño de circuitos impresos como el EAGLE o SolidWorks a través de la instalación de extensiones, si bien es cierto que no siempre es fácil determinar el compilador necesario para cada máquina.

6.6. ALIMENTACIÓN

6.6.1. FUENTE DE ALIMENTACIÓN INTEGRADA

Una de las opciones consideradas es la de incorporar fuentes de alimentación integradas. Éstas presentan la ventaja de ser muy compactas y robustas, y también tienen protección contra cortocircuitos y contra sobretensión. Destacan su facilidad de instalación, utilizando uniones atornilladas, y el hecho de que presenten diversas salidas a diferentes potencias, lo que las hace muy versátiles.



Figura 34: Fuentes de alimentación integradas.

6.6.2. FUENTE DE ALIMENTACIÓN EXTERNA

Otra de las opciones consideradas para la alimentación es la de utilizar fuentes externas de alimentación. Estas fuentes también presentan protección contra cortocircuitos y contra sobretensión y suelen ofrecer más de una salida de tensión, lo que permite mantener en un mismo circuito diferentes niveles de tensión. Son aún más fáciles de implementar que las fuentes mencionadas anteriormente, aunque presentan un mayor tamaño. Por otra parte, ofrecen una función de limitación de corriente que permite proteger de cortocircuitos no solo a la fuente si no también al circuito.



Figura 35: fuentes de alimentación externas.

7. RESULTADO FINAL

7.1. SISTEMA ESTRUCTURAL



Figura 36: Sistema estructural de la PACMAR.

Como se puede ver en la figura precedente, el sistema estructural de la PACMAR está formado por diversas piezas, cumpliendo cada una función distinta. La base de la plataforma consiste en un chasis de soporte, al que van atornilladas una brida de anclaje y su tapa. A su vez, sobre la brida se atornilla un soporte adaptado para las manos. Por último, atornillado a la tapa de la brida, se encuentra un soporte para la mecatrónica de aquellas manos que no la integran en su interior.

7.1.1. CHASIS DE SOPORTE

Para el chasis de soporte se ha elegido una perfilaría de aluminio prefabricada, lo que permite disponer de una estructura resistente y ligera. Los perfiles de aluminio después han sido cortados y perforados para ajustar las dimensiones a las necesidades de la aplicación.

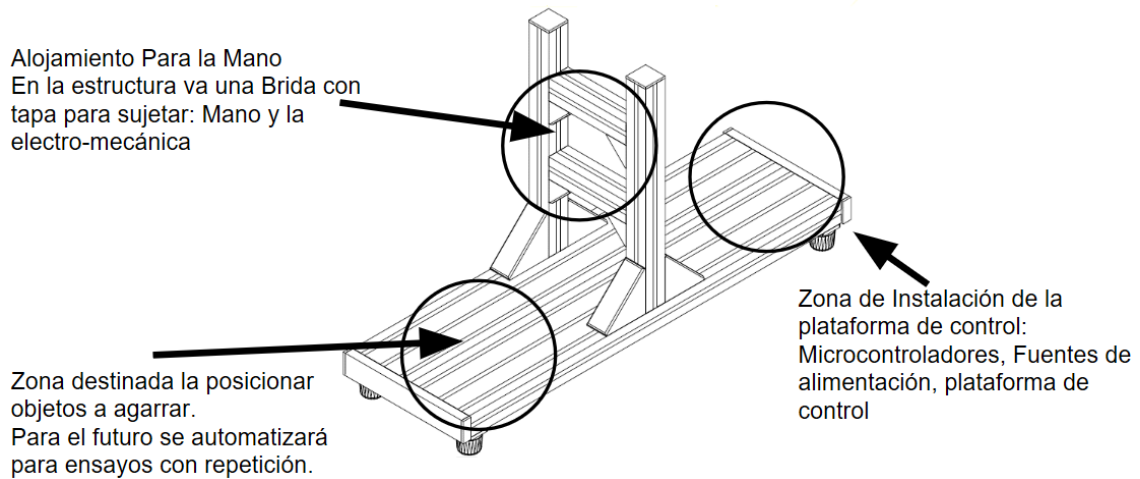


Figura 37: Chasis de soporte de la plataforma PACMAR.

En la imagen precedente se puede apreciar que la base está ranurada para facilitar el anclaje y la fijación de la pieza de alojamiento para la mano, los objetos necesarios para llevar a cabo los diferentes ensayos y los elementos de control. Además, se han incluido cuatro patas para facilitar el transporte de la plataforma.

7.1.2. BRIDA Y TAPA DE LA BRIDA DE ANCLAJE

La brida de anclaje va alojada en el hueco del soporte vertical del chasis de la PACMAR, donde se fija gracias a la presión ejercida por la unión atornillada entre la brida de anclaje y su tapa.

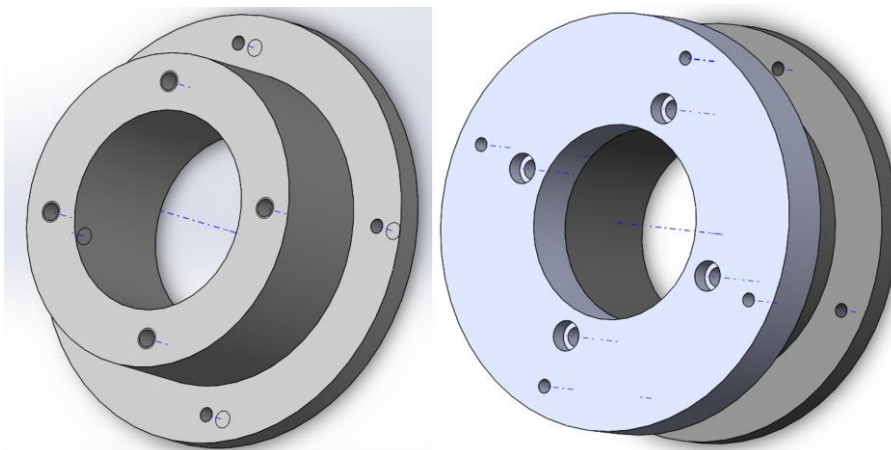


Figura 38: Brida (izq.) y conjunto de la brida y la tapa de anclaje (der.).

Como se puede observar en la imagen superior, aparte de los cuatro agujeros que permiten atornillar la tapa a la brida, ambas piezas disponen de otros cuatro agujeros que se encuentran más alejados del eje central del conjunto. Estos agujeros sirven para fijar la pieza de soporte adaptada a cada mano.

7.1.3. SOPORTE ADAPTADO PARA CADA MANO

Cómo ya se ha mencionado en el apartado anterior, la pieza de soporte puede ir atornillada tanto sobre la brida de anclaje como sobre la tapa de la brida. Para ello, la base de la pieza incorpora tres agujeros que permiten fijar el soporte en diferentes orientaciones.

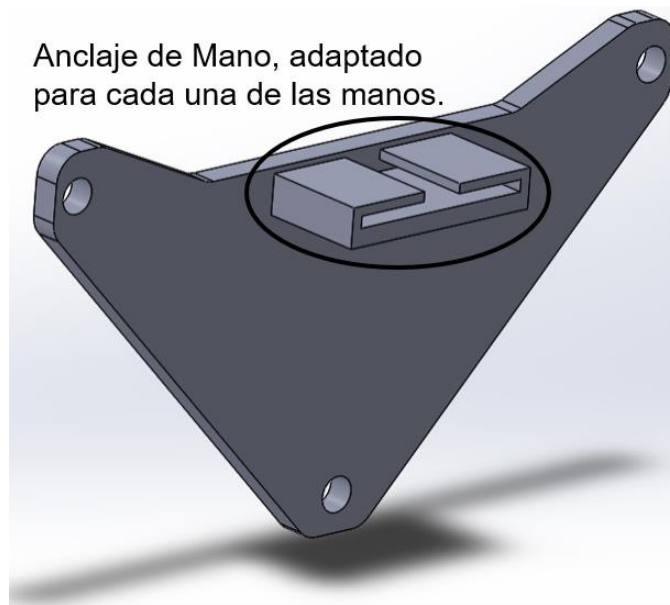


Figura 39: Pieza de soporte adaptada para la IMMA Hand.

7.1.4. SOPORTE ADAPTADO PARA LA ELECTROMECAÁNICA

Dado que no todos los modelos de manos incluyen los huecos para integrar los motores en la propia mano, se hace necesario incorporar una pieza de soporte para anclar la electromecánica de la mano.

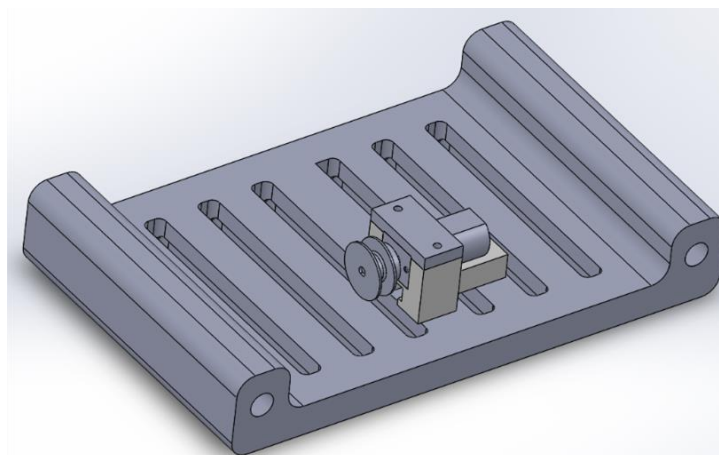


Figura 40: Soporte para la electromecánica de las manos.

Como se puede ver en la **Figura 40**, el soporte dispone de una serie de ranuras en las que van atornilladas otras piezas más pequeñas, que sirven de alojamiento para los motores. A continuación, se muestra esta pieza con más detalle.

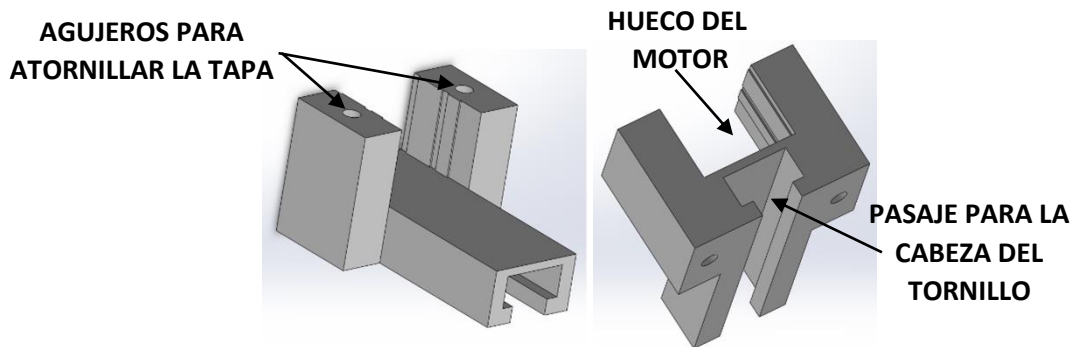


Figura 41: Pieza de fijación de los motores.

7.2. ELECTRÓNICA

7.2.1. MOTORES

Se han escogido los micromotores de corriente continua **HPCB 12V** con reducción 250:1 y doble eje de la marca Pololu, ya que estos motores son pequeños y ligeros, pero al mismo tiempo tienen la potencia suficiente para realizar los agarres. Estos motores ofrecen una velocidad máxima de rotación en vacío de 130 rpm, un par motor máximo de 3 kg·cm¹ y requieren de una corriente nominal de 0.75 A.



Figura 42: Micromotor HPCB 12V 250:1 con doble eje Pololu

Estos motores son fáciles de pilotar a través del uso de drivers, y gracias al doble eje, también es fácil incorporar los *encoders* para el control de rotación. El proceso de incorporación de los *encoders* se explica con más detalle en el punto 7.2.3 ENCODERS.

¹ No se recomienda superar los 2 kg·cm.

7.2.2. DRIVERS

Los drivers utilizados son los **TB6612FNG** de Pololu, que permiten cada uno el control de hasta dos motores de corriente continua bidireccionales usando señales de modulación por ancho de pulsos, comúnmente conocidas como señales PWM (del inglés, Pulse Width Modulation).

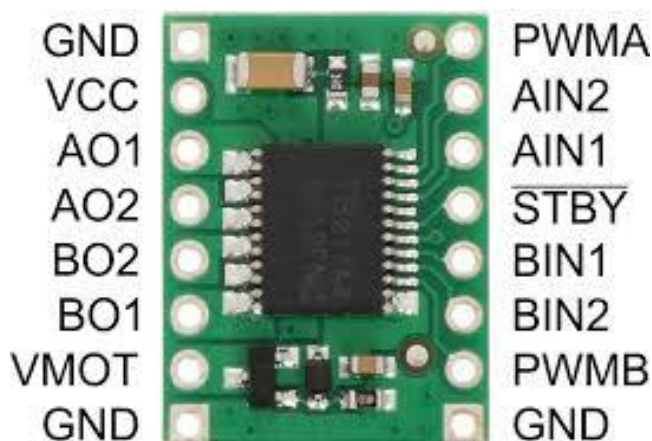


Figura 43: Driver TB6612FNG.

En cuanto a la alimentación, son necesarios 12V para la etapa de potencia (VMOT) y 5V para la etapa de lógica (VCC), estando todas las masas conectadas internamente. Referente a la potencia disponible, a 12V son capaces de aportar un 1A por motor en continuo y hasta 3A de pico. Por último, hay que tener en cuenta que la frecuencia máxima de la señal PWM a proporcionar debe ser de 100 kHz.

Por otro lado, estos drivers están basados en el circuito de puente en H, que permite el control de los motores en los dos sentidos. Este circuito está compuesto de cuatro transistores que hacen las veces de interruptores. De esta manera, según qué par de interruptores estén activados a la vez, la corriente circula a través del motor en un sentido o en otro.

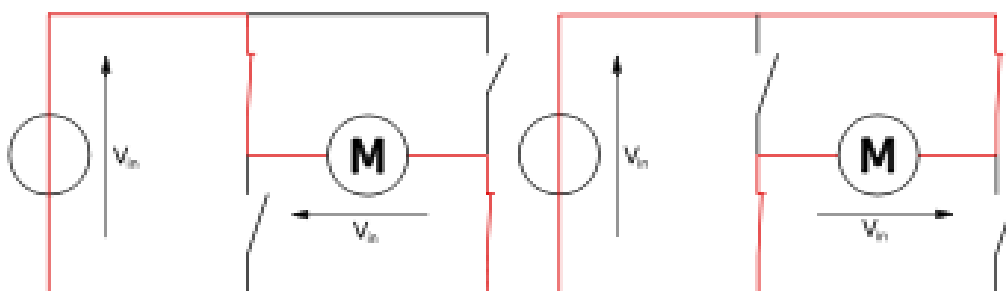


Figura 44: Esquema de funcionamiento de un puente en H en sus dos estados.

En última instancia, el control de la apertura y cierre de los interruptores se hace a partir de la alimentación de los pines IN1, IN2 y STBY, siguiendo la lógica expuesta en la siguiente tabla de verdad:

STBY	IN1	IN2	OUT1	OUT2	Modo
L	-	-	L	L	Sleep Mode
H	H	H	L	L	Frenado rápido
H	L	H	L	H	Rotación antihoraria
H	H	L	H	L	Rotación horaria
H	L	L	OFF	OFF	Stop

Tabla 1: Tabla de verdad de los drivers TB6612FNG.

Como se puede deducir a partir de la tabla anterior, los pines OUT1 y OUT2 van conectados directamente al motor. Por otra parte, con la amplitud de la PWM se controla la potencia suministrada al motor, que se traduce en velocidad de giro y en par motor.

7.2.3. ENCODERS

Debido a su simplicidad de implementación en el sistema, para el control de posición se han escogido los *encoders* magnéticos **12 CPR 2.7-18V** que, gracias a los dos canales digitales de salida, además de la posición angular permiten conocer el sentido de rotación del eje. Estos sensores están compuestos de dos partes: un circuito impreso que debe soldarse directamente al motor y un disco magnético que está diseñado para ser insertado fácilmente sobre el eje extendido de los micromotores de la marca Pololu.

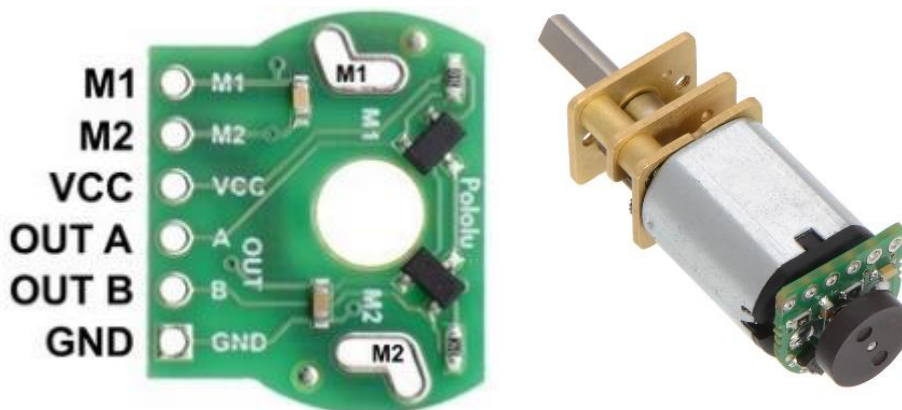


Figura 45: Vista de detalle del circuito impreso para el encoder 12 CPR 2.7-18V (izq.)
y conjunto del motor con el circuito más el disco magnético (der.).

En el circuito impreso de la figura precedente, se puede observar que éste incorpora tanto las conexiones de alimentación del motor como las del *encoder*. A la hora conectar la alimentación (VCC), se debe tener en cuenta que ésta se debe encontrar entre 2,7 y 18 V, sabiendo además que la señal de salida digital (OUT A y OUT B) variará entre -0,7V y la tensión de alimentación. La corriente máxima de salida es de 20 mA.

Por otra parte, a la hora de realizar las lecturas en el microcontrolador, se debe considerar que estos sensores proveen una resolución de 12 impulsos por revolución. Así, la frecuencia máxima de la señal digital de salida se puede calcular según la siguiente expresión:

$$F_{\text{máx}} = 12 \times \text{Velocidad de rotación máx. (rpm)} \times \text{Ratio de reducción}$$

En este caso, sabiendo que disponemos del micromotor **HPCB 12V** con reducción 250:1, se obtiene que:

$$F_{\text{máx}} = 12 \times 130 \times 250 \approx 400 \text{ kHz}$$

7.2.4. SENSORES DE CORRIENTE

Los sensores de corriente escogidos son los **LTSR 6-NP**, distribuidos por Farnell. La principal ventaja de estos sensores es su facilidad de implementación y uso. Ya que se pueden instalar en un circuito independiente externo a las manos, parece el más adecuado para la PACMAR.

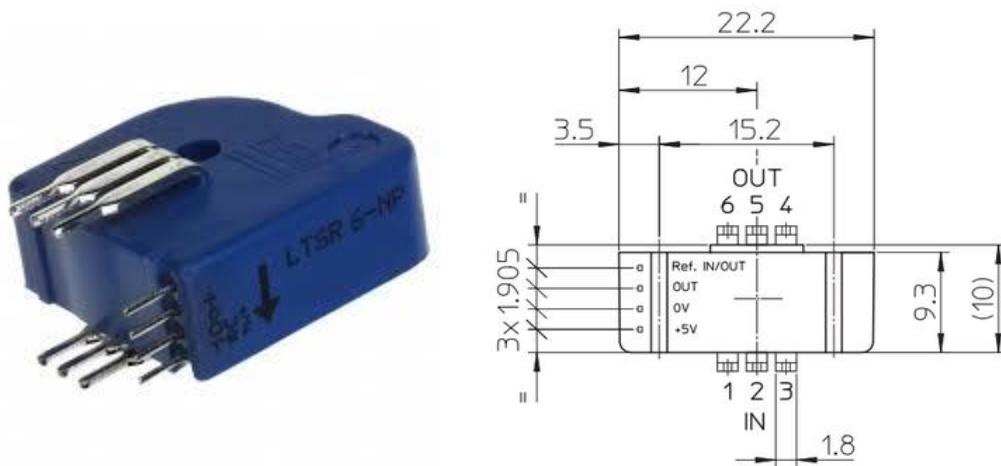
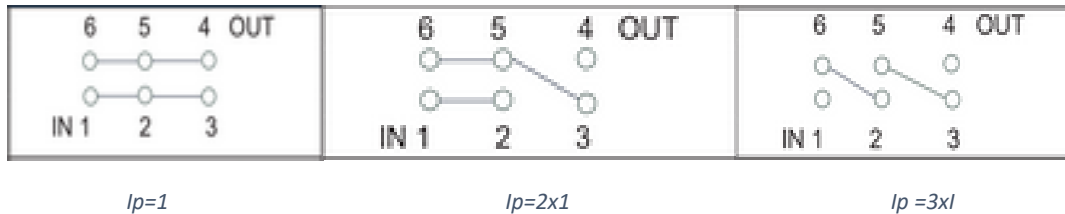


Figura 46: Sensor de corriente LTSR 6-NP.

Estos sensores proporcionan una señal analógica en voltaje proporcional a la corriente medida con un rango de 5V y centrada en un voltaje de referencia de 2,5V, según la siguiente expresión:

$$V_{out} = 2,5^1 \pm \frac{0,625 \times I_p^2}{6} V$$

1. Este valor puede variar entre 2,475 V y 2,525 V según el valor del voltaje del pin ref.
2. El valor de I_p depende de las conexiones de los pines 1-6:



Para fijar el voltaje de referencia a 2,5 V, se utilizará un divisor de tensión con dos resistencias de 330 kΩ conectadas en serie a la alimentación de 5V. El valor de las resistencias se ha escogido para respetar los 220 kΩ mínimos especificados en el documento de especificaciones técnicas del componente.

Por otra parte, cabe mencionar que estos sensores normalmente se utilizan en aplicaciones que implican motores más potentes con un consumo mayor de corriente (hasta $\pm 19.2A$). Dado que en este caso la corriente máxima que se va a medir es de 3A, habrá que tener en cuenta que la medida sólo sufrirá pequeñas variaciones, por lo que se puede ver muy afectada por el ruido.

7.2.5. EL PROCESADOR

Para el procesador, se ha elegido el sistema **CompactRIO 9049** de National Instruments, debido a su mayor potencia de cálculo y su gran modularidad, que lo convierten en una herramienta idónea para su uso en investigación.

Para esta aplicación se ha decidido incorporar un módulo analógico **NI9205** para la medición de las señales proporcionadas por los sensores de corriente, y un módulo digital **NI9403** para obtener las lecturas de los encoders.

El módulo **NI9205** incluye 32 entradas analógicas codificadas sobre 16 bits, que hacen posible el tratamiento de hasta 32 señales distintas (en modo diferencial, sólo 16) con una frecuencia máxima de adquisición de 250000 muestras por segundo y dentro del rango de ± 10 VDC.

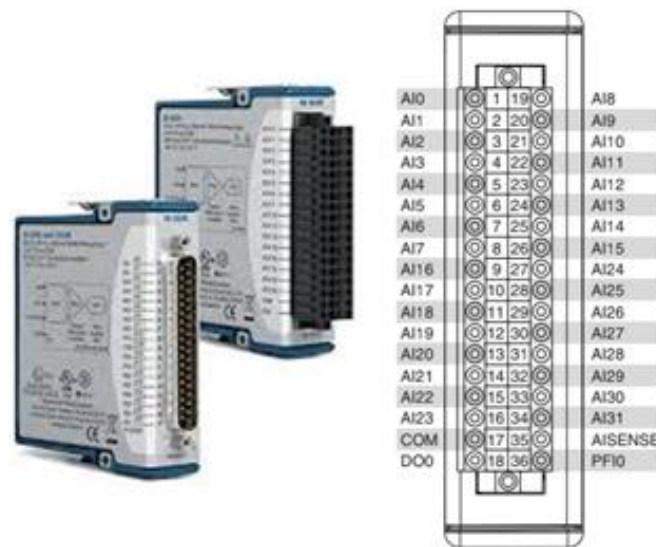


Figura 47: Módulo NI 9205

Como se puede observar en la Figura 7, a parte de los 32 pines de lectura analógica, el módulo dispone de cuatro conexiones extra, cuyas funciones se recogen en la siguiente tabla:

Pin	Descripción
AISENSE	Pin de referencia para todos los inputs analógicos en el modo NSRE.
COM	Pin conectado internamente a la referencia de masa aislada.
DO	Canal de salida digital.
PFI	Señal de interfaz de función programable que funciona como una entrada digital.

Tabla 2: Descripción de las entradas especiales del módulo NI 9205.

Por otra parte, es necesario saber que este módulo permite tres configuraciones distintas: el modo RSE (Referenced Single-Ended signals), el modo NSRE (Non-referenced single-ended signals) y el modo diferencial.

1. **Configuración RSE:** En esta configuración, todas las medidas se hacen con respecto al puerto COM.

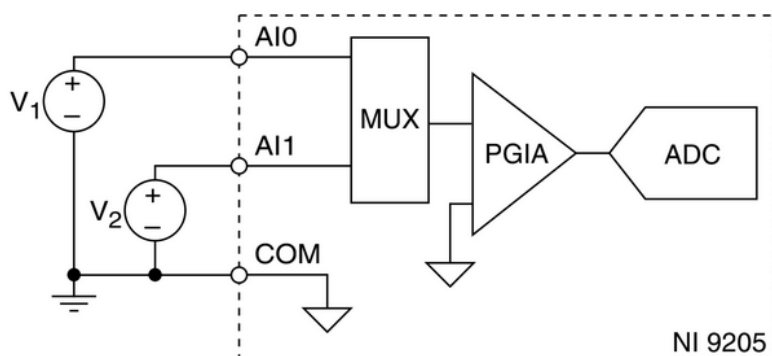


Figura 48: Esquema de conexión en el modo RSE.

2. **Configuración NSRE:** En este modo, todas las medidas se hacen en referencia al pin AISENSE, lo que permite tener un acceso a parte para la masa y además proporciona un mayor rechazo al ruido que en la conexión RSE.

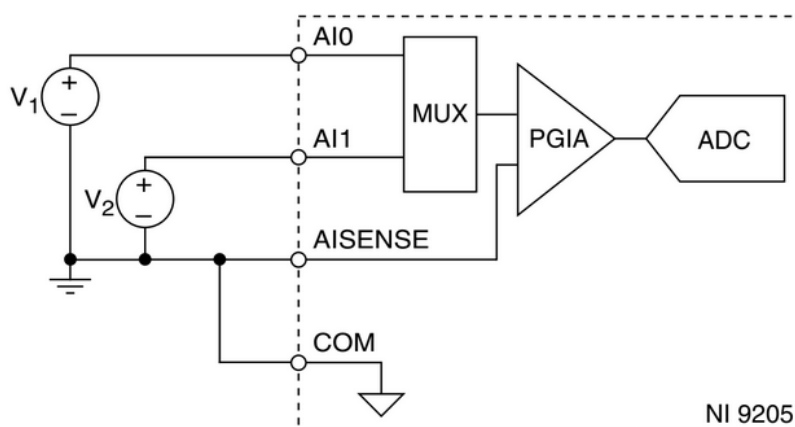


Figura 49: Esquema de conexión en el modo NSRE.

3. **Configuración diferencial:** En esta configuración, el módulo NI9205 es capaz de conseguir las medidas más precisas y con menos ruido, pero se reduce a la mitad la cantidad de señales que se pueden tratar.

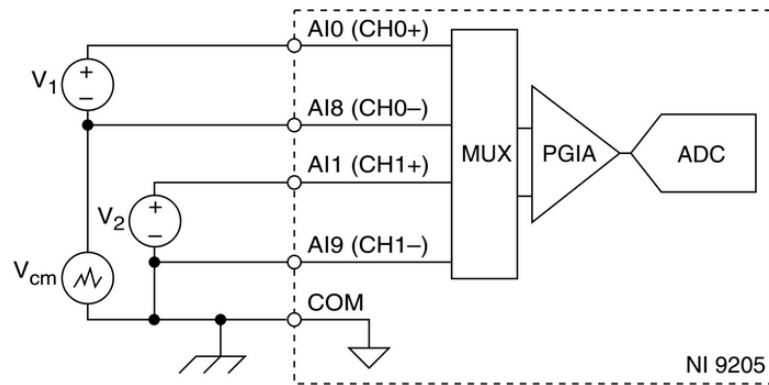


Figura 50: Esquema de conexión en el modo diferencial.

En esta aplicación, dado que en el módulo **NI9205** no se van a conectar más de 6 sensores distintos, se ha decidido realizar las conexiones en el modo diferencial para mejorar la calidad de la señal obtenida.

En cuanto al módulo **NI9403**, este incluye 32 entradas/salidas digitales de 5V de la familia TTL (transistor-transistor logic), basados en la tecnología de los transistores bipolares. Además, estas entradas permiten una entrada de corriente de hasta 250 μ A y pueden proporcionar hasta una corriente de salida de 64 mA. La frecuencia máxima de adquisición de este módulo es de 1143 kHz, lo que debería ser suficiente para la lectura de los encoders (cuya señal tiene una frecuencia de unos 400 kHz).

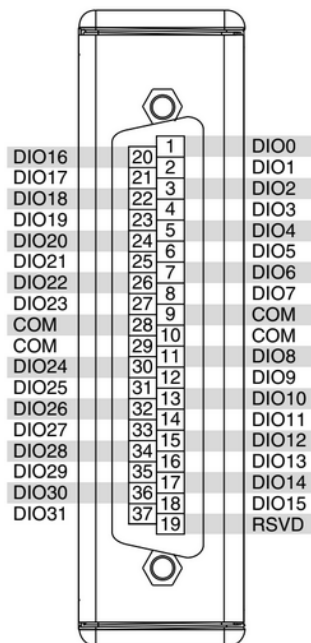


Figura 51: Pinout del módulo NI9403.

Como se puede observar en la Figura 11, a parte de los 32 pines digitales, el módulo dispone de cuatro conexiones COM y una entrada RSVD, que está reservada por el autómata y que el usuario no puede utilizar.

Hay que tener en cuenta que los pines del módulo **NI9403** pueden funcionar tanto como entradas como salidas, por lo que antes de implementar cualquier aplicación se deben configurar según el uso que se les vaya a dar.

7.3. ALIMENTACIÓN

A continuación, se ofrece una tabla resumiendo los requisitos de alimentación:

Dispositivo	Voltaje	Potencia nominal	Potencia máx
CompactRIO	9-30 V	16 W	60 W
Sensor de corriente LTSR 6-NP	4,75-5,25 V	6x (0,14 W)	6x (0,15 W)
Encoder micromotor	2,7-18 V	6x (0,07 W)	6x (0,11 W)
Driver TB6612FNG (Etapa lógica)	2,7-5,5 V	3x (\approx 0 W)	3x (0,01 W)
Micromotores HPCB 12V 250:1	12V	6x (1.1 W)	6x (9 W)

Tabla 3: Tabla resumen de los requisitos de alimentación de los diferentes dispositivos.

Teniendo en cuenta los datos recogidos en la tabla anterior, se decide utilizar dos niveles de alimentación distintos, uno a 5 V para alimentar los sensores y la etapa de lógica de los drivers y otro a 12 V para la etapa de potencia de los motores y el CompactRIO. Los requisitos de las dos salidas de alimentación se detallan a continuación:

Tipo de Fuente	Potencia Nominal	Potencia Máxima
Fuente de 12 V	23 W	114 W
Fuente de 5 V	1,5 W	1,7 W

Tabla 4: Resumen de los requisitos de las fuentes de alimentación.

En un principio, se ha decidió usar una fuente de alimentación doble FA-665B de la marca PROMAX, con voltaje máximo de 30 V y limitación de corriente a 5 A. Teniendo en cuenta la corriente máxima que pueden aportar, la potencia máxima disponible es de 60 W en el caso de la salida a 12 V y de 25 W cuando la salida es de 5 V.



Figura 52: Fuente de alimentación doble FA-665B PROMAX.

Se puede observar a partir de la información anterior, que en el peor caso posible las fuentes no serían capaces de aportar la potencia máxima necesaria. Sin embargo, este caso se corresponde con un instante en el que tendría que coincidir que todos los motores y el CompactRIO estuvieran demandando al mismo tiempo la corriente máxima admisible, situación que es muy improbable.

7.4. CIRCUITO IMPRESO

El circuito impreso permite asegurar las conexiones entre los diferentes componentes que conforman la electrónica de la PACMAR y las entradas y salidas de los módulos del microcontrolador.

La primera etapa en el desarrollo del circuito impreso con EAGLE consiste en la realización del esquema de cableado. Aunque el programa dispone de sus propias librerías de componentes electrónicos, éstas no incluyen ni los drivers TB6612FNG ni los sensores de corriente LTSR 6-NP. Por esta razón, antes de realizar el esquema se debe crear una nueva librería que contenga los símbolos y los planos con las dimensiones y los pines de estos dispositivos, tal y como muestra la figura siguiente:

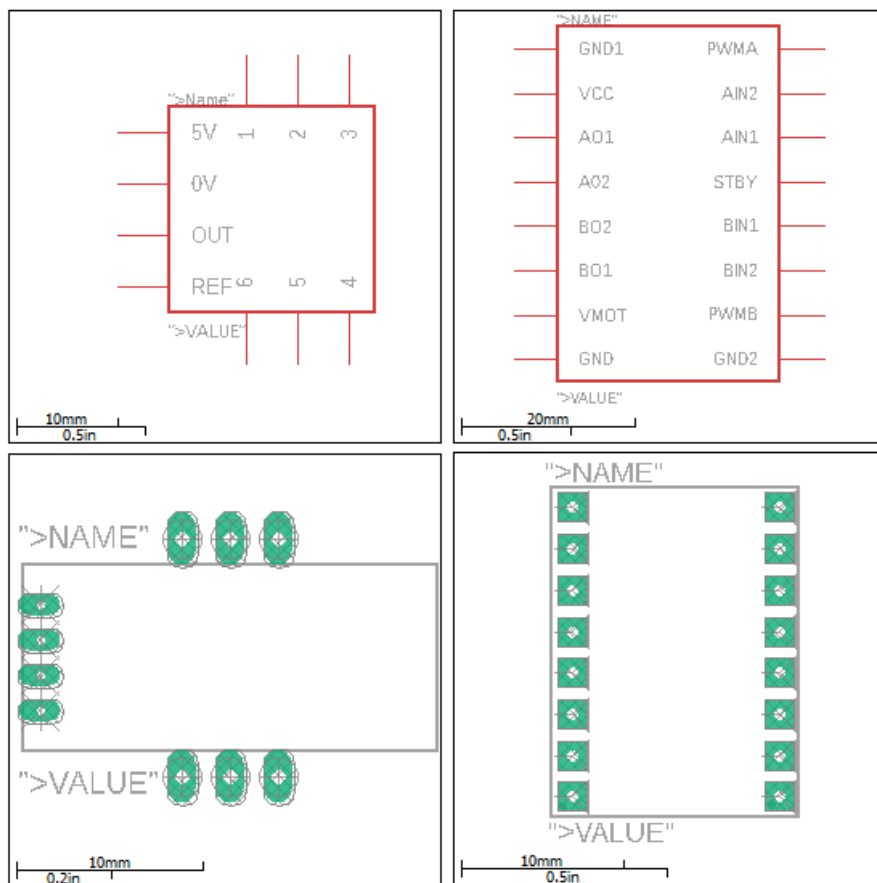


Figura 53: Diseño del sensor LTSR 6-NP (izq.) y del Driver TB6612FNG (der.).

Una vez se dispone de las librerías con todos los componentes necesarios, ya se puede pasar a diseñar el esquema de cableado. En la figura siguiente se puede observar el esquema de cableado de uno de los tres bloques en los que se divide el circuito (1 bloque por cada dos motores):

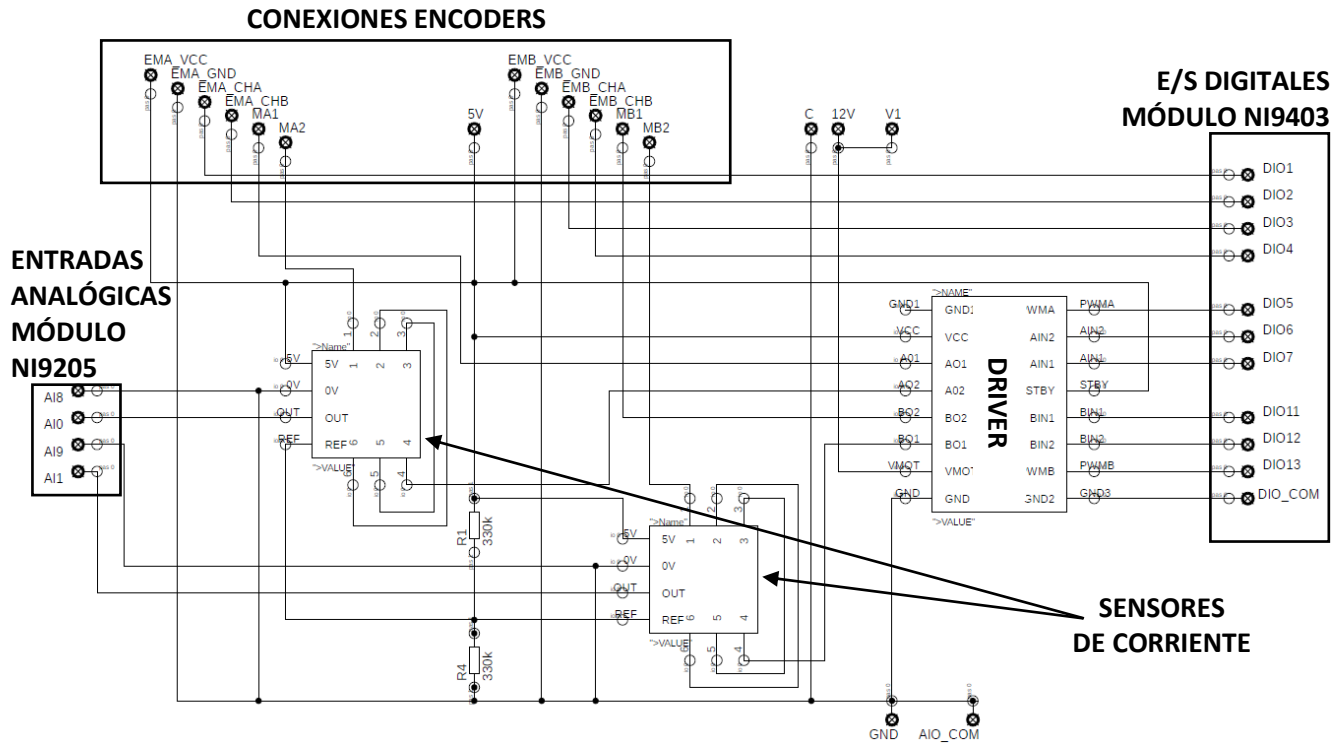


Figura 54: Bloque del esquema de cableado para un driver.

Una vez se dispone del esquema de cableado, EAGLE ya permite realizar el layout de la placa a imprimir:

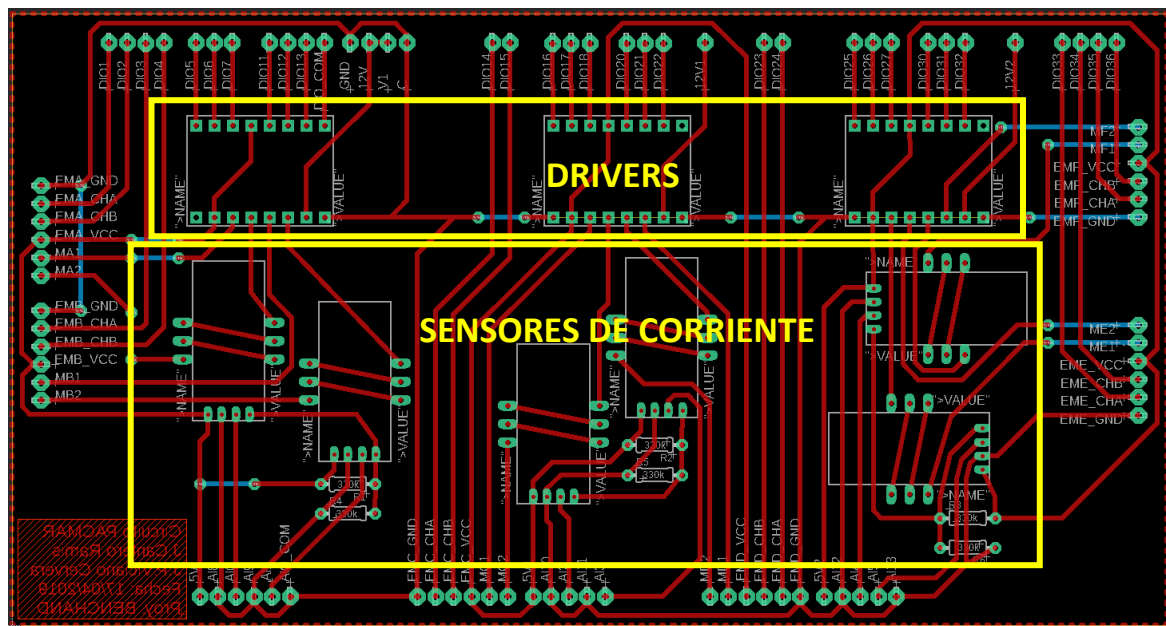


Figura 55: Layout del circuito impreso.

A continuación, se muestra el dibujo impreso del circuito que se ha utilizado como fotolito para fabricar la placa siguiendo la técnica fotográfica:

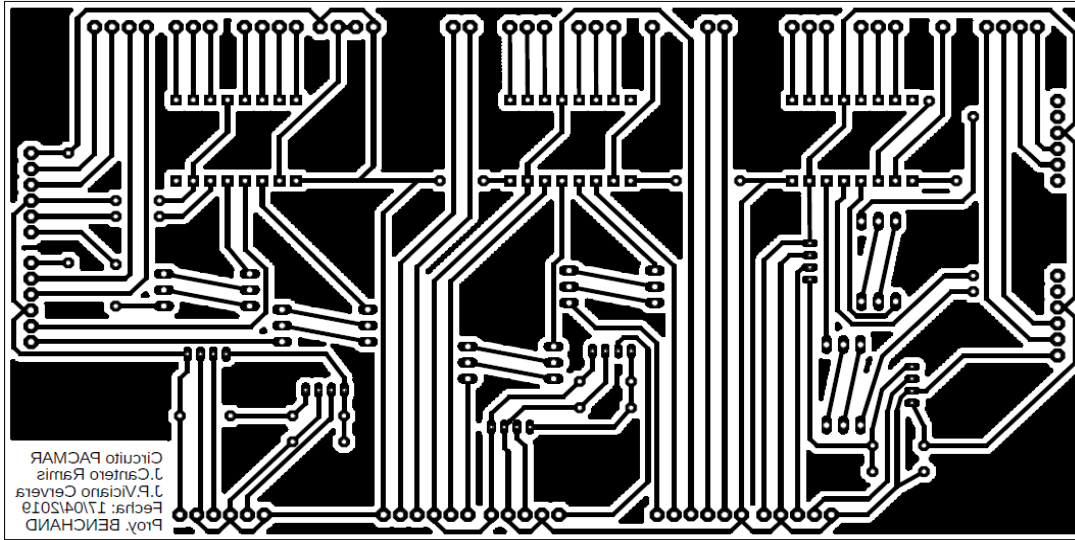


Figura 56: Fotolito para la impresión del circuito.

Este fotolito, que es un negativo del circuito impreso final, presenta unas dimensiones de 160x80 mm. Cabe mencionar que sólo se dispone del diseño de una capa ya que, a la hora de diseñar el circuito, se ha tenido en cuenta que éste sólo se podía imprimir en una cara de la placa y que los componentes se debían soldar a mano. Por esta razón, para solucionar el problema de la aparición de cruce entre los cables, se han incorporado al circuito vías, que más adelante se unirán a través de puentes conductores.

7.5. CONCEPCIÓN DEL SOFTWARE

7.5.1. PROGRAMACIÓN DE LA SEÑAL PWM

El control de los motores se hace a través del envío desde el microcontrolador de señales digitales del tipo PWM (Pulse Width Modulation). Una señal PWM se caracteriza por ser de frecuencia constante, pero de anchura de pulso variable, de manera que regulando el tiempo que la onda se mantiene en alto dentro del periodo (ciclo de trabajo), se puede controlar la energía transmitida al motor y por lo tanto su velocidad:

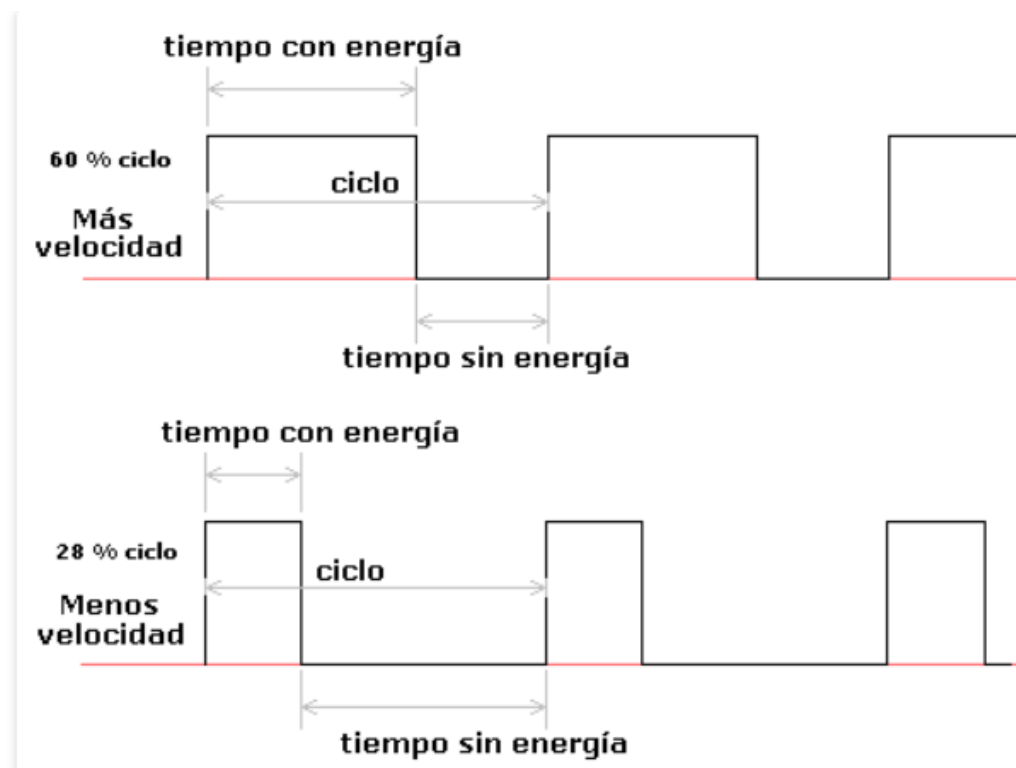


Figura 57: Forma de onda de una señal PWM.

Para implementar este control en LabView, se ha utilizado el siguiente diagrama de bloques:

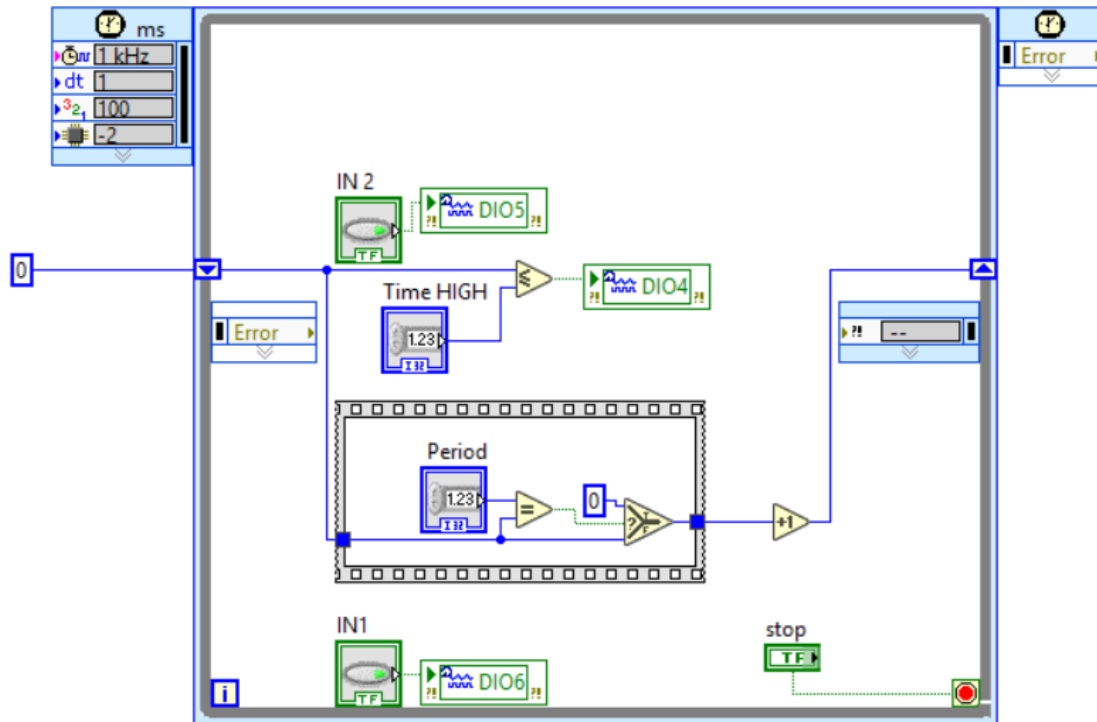


Figura 58: Bucle de control de la señal PWM.

El bloque mostrado en la figura precedente se corresponde con un bucle **while** en el lenguaje de programación de LabView. En la esquina superior izquierda se puede observar un cajetín con diferentes campos, que son los que permiten configurar el bucle:

Campo	Función
	Permite fijar la frecuencia base del bucle.
	Permite fijar la duración del bucle.
	Permite determinar la prioridad del bucle con respecto al resto de bucles.
	Permite asignar el bucle a un procesador en concreto.

Tabla 5: Opciones de configuración de un bucle while.

Tanto en la esquina superior derecha como en el interior del bucle se puede observar también el bloque **Error**. La salida de este bloque cambia de estado cuando se produce un error de tipo bucle no ejecutado, de bucle ejecutado con retraso o de salida del bucle antes del tiempo.

En el interior del bloque lo primero que se han introducido son dos botones conectados a dos de las salidas digitales del módulo **NI9043**. Estas entradas están conectadas a los pines **AIN1** y **AIN2** del driver **DVR6612FNG**, lo que permite seleccionar el estado y el sentido de rotación de los motores según la tabla de verdad (cf. Tabla 1).

Por otra parte, en los laterales del bloque **while** se pueden observar dos flechas azules. Éstas se corresponden con un registro de memoria, donde el color azul indica que lo que se almacena es un dato de tipo **Int**. Conectada a este registro de memoria, se puede observar la siguiente estructura:

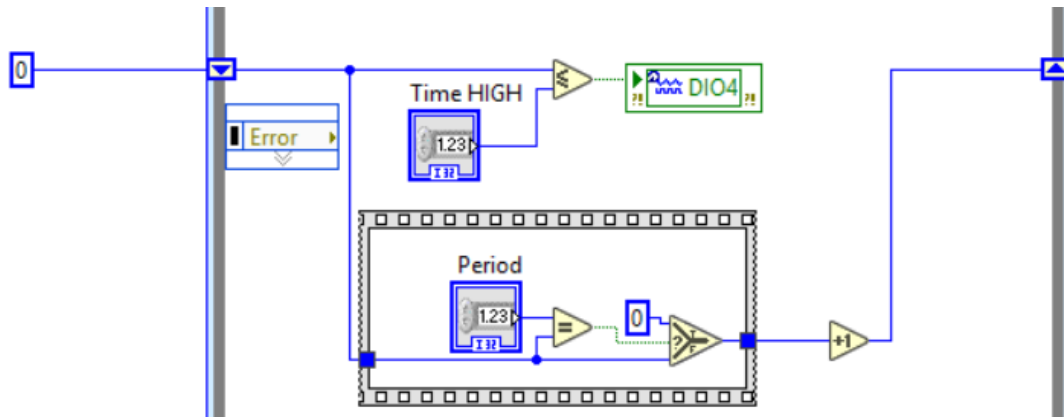


Figura 59: Modulación del pulso y del periodo de la señal PWM.

En la parte superior de la estructura, se puede observar un comparador. Éste se encarga de mantener la salida del módulo **NI9403** conectada a la entrada **PWMA** del driver en estado alto mientras el valor del registro sea menor al valor fijado por la entrada numérica **Time HIGH**, lo que permite fijar el valor del ciclo de trabajo.

En la parte inferior de la estructura se encuentra un bloque de incremento, que se encarga de aumentar el valor almacenado en el registro cada vez que se ejecuta el bucle **while**. Esto se repite hasta que el valor del registro es igual al valor especificado en **Period**, momento en el cual el contador se reinicia y comienza un nuevo periodo de la señal.

De esta forma, modificando el valor de **Period**, se puede modificar la duración de la señal y por lo tanto la frecuencia de la misma, sabiendo que la frecuencia es igual a la inversa del periodo.

A continuación se muestra la interfaz de usuario que permite controlar los estados de **IN1** e **IN2** y los valores de las variables **Time High** y **Period**, que deben ser del orden de ms ya que la frecuencia del bucle es de 1 kHz.

Cabe mencionar que también se ha añadido un botón de STOP para detener la ejecución del bucle.

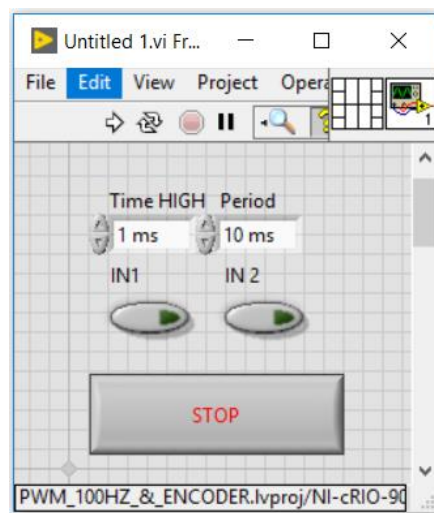


Figura 60: Interfaz de usuario para el control de un motor por PWM.

7.5.2. PROGRAMACIÓN DE LA LECTURA DE LOS ENCODERS

El bucle de lectura de los encoders es el siguiente:

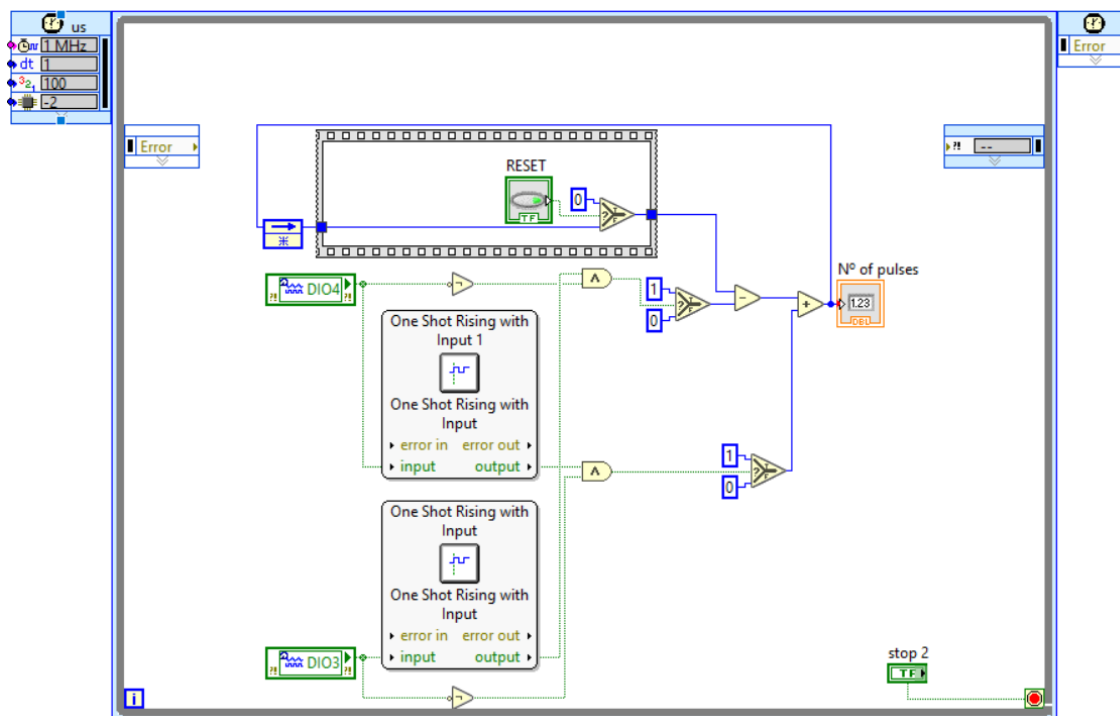


Figura 61: Bucle de control de posición de los motores.

Lo primero que se puede observar es que la frecuencia de ejecución del bucle **while** se ha establecido en 1 MHz, que es equivalente a 2,5 veces la frecuencia máxima de la señal (estimada en el apartado 7.1.3. en 400 kHz) proporcionada por los encoders, lo que debería garantizar que incluso en el peor caso no se perderá ni un pulso. Además, la frecuencia máxima de la señal de los encoders se da cuando el motor gira en vacío a máxima velocidad, lo que no se va a producir nunca en esta aplicación (frecuencia típica de la señal <2kHz).

Por otra parte, en el interior del bucle se puede observar que se han implementado dos instancias del bloque de función de detección de flanco ascendente.

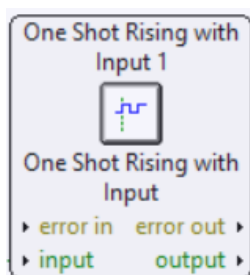


Figura 62: Bloque función de detección de flanco ascendente.

Ante la detección de un flanco ascendente, la salida de este bloque se mantiene en valor alto durante toda la ejecución del bucle **while**, pasando entonces a cero hasta la detección de un nuevo flanco ascendente.

El funcionamiento de este bloque permite entonces conocer el sentido de giro del motor, ya que cuando se produce el giro en un sentido el flanco ascendente del **Canal A** se da al mismo tiempo que el **Canal B** vale 0 y cuando el giro se produce en el sentido opuesto, los dos canales invierten el desfase.

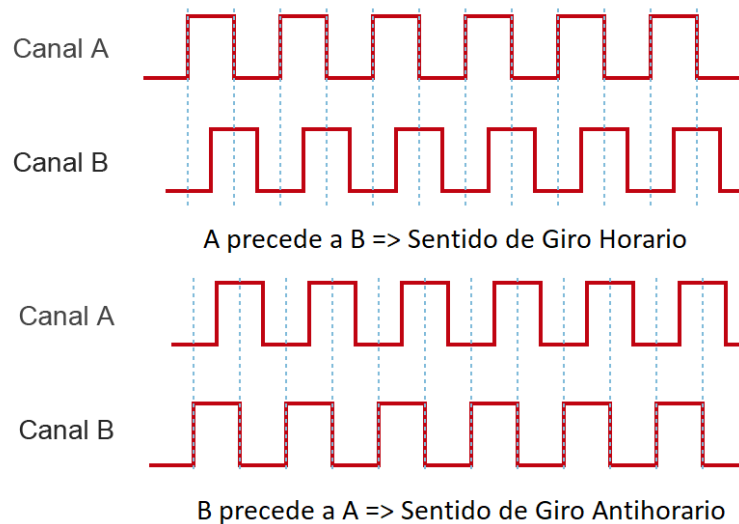


Figura 63: Determinación del sentido de giro del motor a partir de la lectura de los dos canales del encoder.

De esta manera, lo que se ha decidido hacer en el programa es implementar un contador que se incremente cuando el motor gira en un sentido y decremente cuando gire en el opuesto. Adicionalmente se ha implementado un botón de **Reset** para poder poner el contador a 0, lo que permite establecer una nueva referencia si el usuario así lo desea. Así, en la siguiente imagen se puede ver cómo queda la interfaz de usuario al añadir esta función:

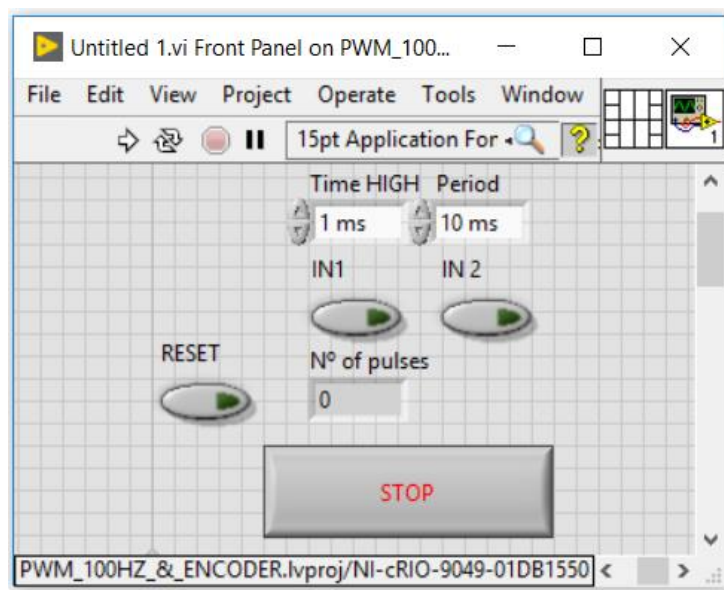


Figura 64: Interfaz de usuario para control por PWM y lectura del encoder.

7.5.3. PROGRAMACIÓN DE LA LECTURA DE CORRIENTE

La lectura de corriente, a diferencia del control de posición, se hace a través del sensor analógico **LTSR 6-NP**. A la hora de programar la lectura del sensor, hay que recordar que éste proporciona un voltaje proporcional a la corriente medida según la expresión:

$$V_{out} = 2,5 \pm \frac{0,625 \times I_p}{6} V$$

Donde el valor de I_p depende del tipo de conexión. En este caso, se ha escogido el tercer tipo de conexión, que amplifica la corriente medida por un factor 3. Así, la expresión final queda:

$$V_{out} = 2,5 \pm \frac{0,625 \times I}{2} = 2,5 \pm (0,3125 \times I) V$$

De esta manera, despejando de la ecuación anterior el término de la corriente medida, se obtiene:

$$I = (V_{out} - 2,5) \times 3,2 A$$

Se puede deducir fácilmente a partir de la expresión anterior que la corriente puede tener un valor negativo. Esto se debe al cambio de sentido que experimenta la corriente cuando se invierte el sentido de giro del motor.

Por otro lado, para configurar el bucle de lectura hay que tener en cuenta el teorema de Nyquist, por lo que la frecuencia del mismo debe ser 10 veces superior al de la señal proporcionada por el sensor. En este caso, la frecuencia de la corriente que alimenta al motor es la misma que la de la señal PWM. Así, si la frecuencia de esta señal no supera los 100 Hz (periodo nunca inferior a 10 ms), el bucle puede funcionar a una frecuencia base de 1kHz.

Finalmente, al tratarse de una señal analógica, se debe determinar cuál es la característica de la onda que queremos registrar. A continuación se muestra la forma de la señal obtenida con el osciloscopio, restando el offset de 2,5 V y cuando el driver recibe consignas de una señal PWM a 100 Hz y para diferentes ciclos de trabajo del 30%, 50% y 70%:

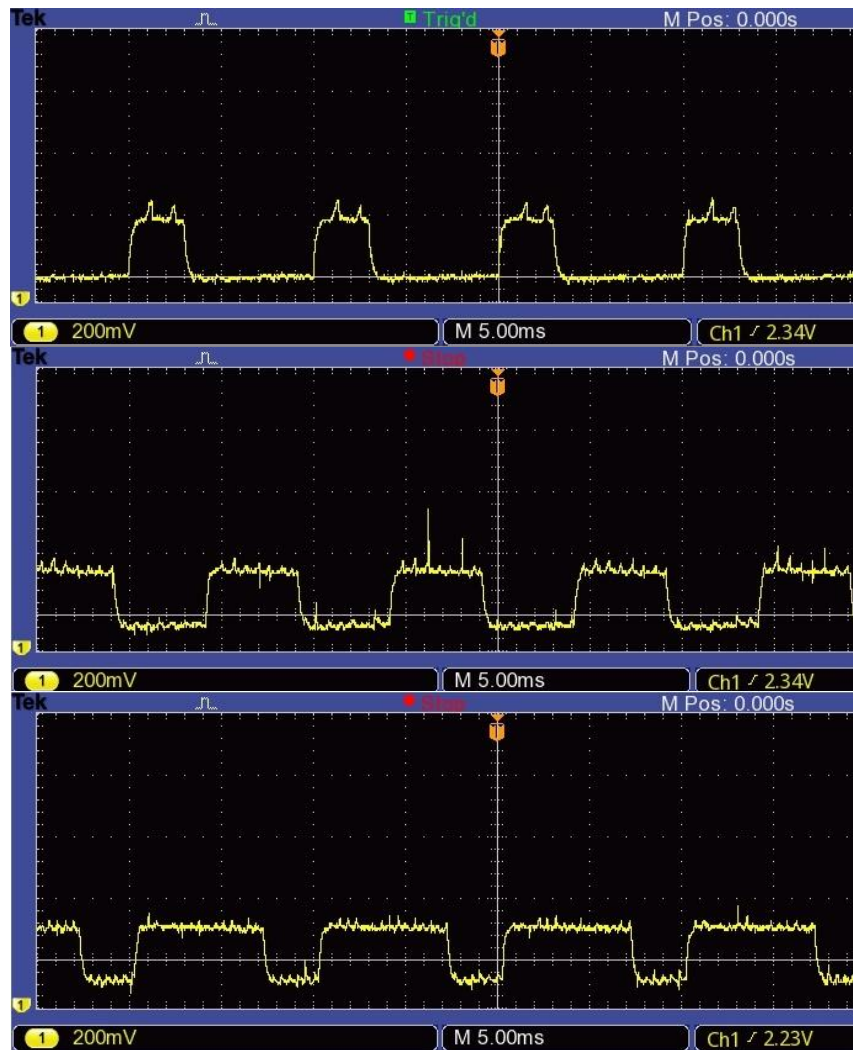


Figura 65: Corriente del motor con PWM de 100 Hz con ciclo de trabajo del 30% (arriba), 50% (medio) y 70% (abajo).

A partir del análisis de la corriente para los diferentes ciclos de trabajo, se ha constatado en primer lugar que la amplitud de la onda es la misma, si bien se produce una disminución del offset conforme el ciclo de trabajo aumenta.

Este hecho, sumado a la aparición de varios picos de ruido que presentan una amplitud similar a la de la onda base, lleva a descartar el uso de la amplitud como característica de medida.

Sin embargo, sí que se ha podido observar que la señal sigue aproximadamente la misma forma que la de la señal PWM de consigna (mismo ciclo de trabajo y mismo periodo).

Por esta razón, se ha decidido tomar como medida el valor eficaz de esta señal, ya que en esta aplicación es una magnitud que permite identificar más fácilmente cual es el estado del motor en el control de fuerza.

Tomando en consideración todo lo expresado anteriormente en este punto, se ha implementado el siguiente programa:

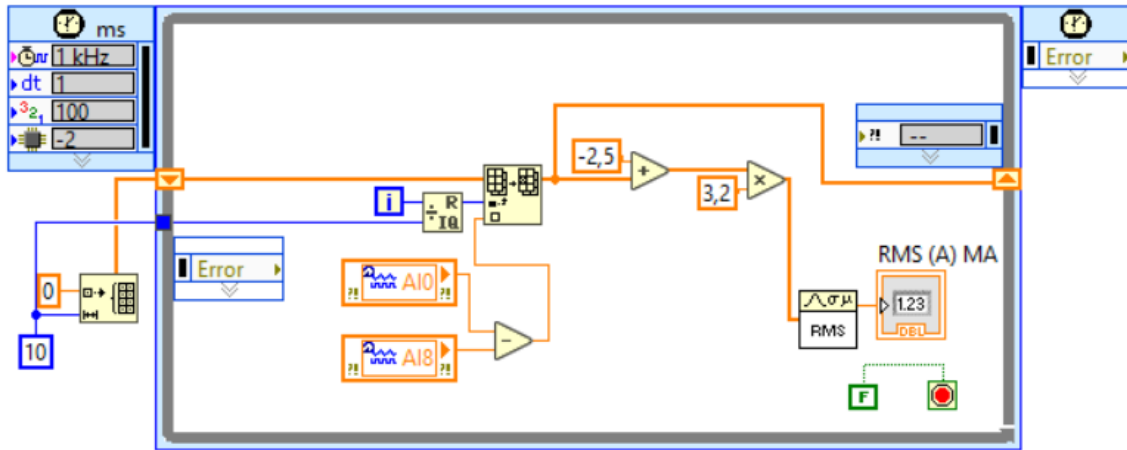


Figura 66: Bucle de lectura de un sensor de corriente.

Se puede observar que lo primero que se hace es sustraer al valor de las medidas obtenidas a través de la entrada analógica **AIO** el valor de **AI8**. Esta operación permite mejorar la calidad de la señal al eliminar la aparición de los fenómenos tanto de offset como de ruido producidos por el modo común.

El siguiente paso consiste en introducir el valor de la resta en el interior de un vector, para después convertir el voltaje proporcionado por el sensor en la corriente real introducida en el motor.

Por último, una vez se dispone del vector conteniendo los diferentes valores de la corriente a lo largo de un periodo, ya se puede calcular el valor eficaz de la señal usando la función RMS de LabView. Es importante destacar que el valor eficaz se muestra al usuario utilizando un indicador numérico.

Tras la implementación de la función de lectura de corriente, la interfaz toma la siguiente forma:

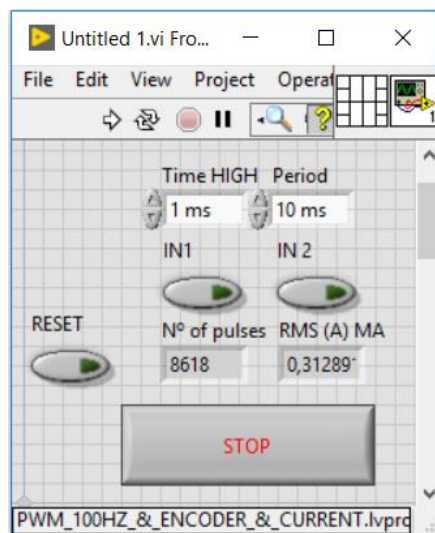


Figura 67: Interfaz de usuario con la lectura de corriente.

8. PRUEBAS DE VALIDACIÓN

8.1.1. COMPROBACIÓN DE LA SEÑAL PWM GENERADA

Para pilotar los motores, se ha decidido que la frecuencia de la señal se fijara en 100 Hz (periodo de 10 ms), de manera que se pueden escoger hasta 10 velocidades distintas del motor en función de la duración de **Time HIGH**. A continuación se muestran las medidas, obtenidas con el osciloscopio, de la señal generada para diferentes ciclos de trabajo:

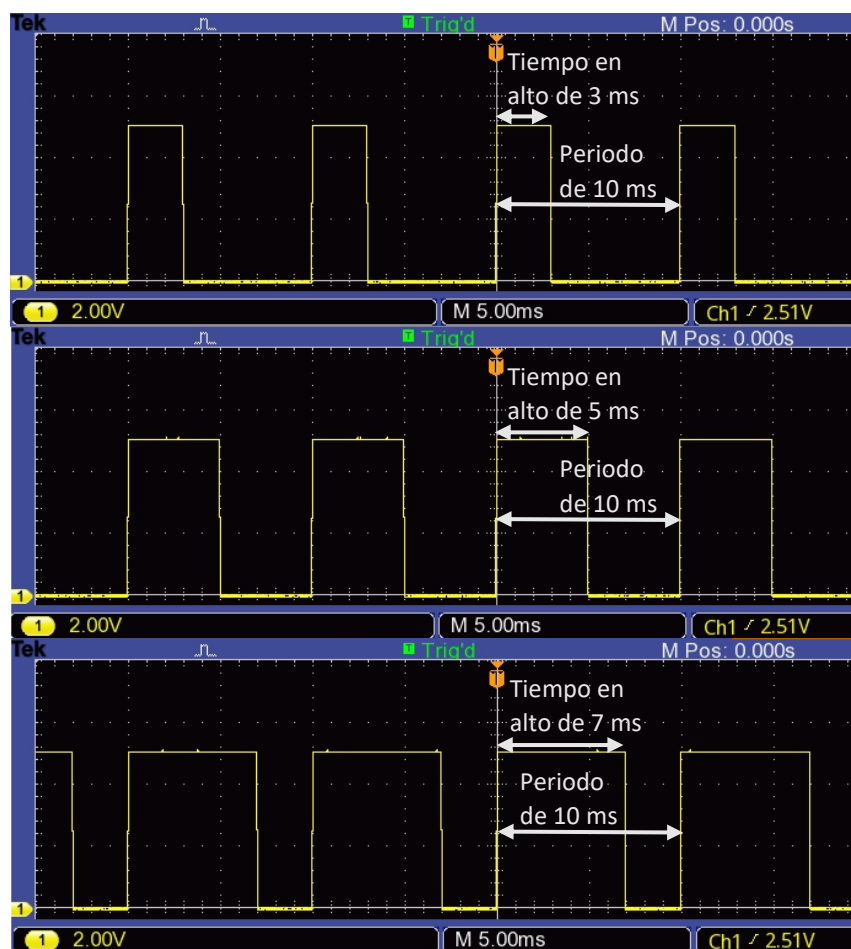


Figura 68: PWM de 100 Hz con ciclo de trabajo del 30% (arriba), 50% (medio) y 70% (abajo).

Como se puede ver, la calidad de la señal generada en todos los casos es bastante buena, respetándose tanto los ciclos de trabajo especificados en la interfaz como la duración del periodo.

8.1.2. COMPROBACIÓN DE LA LECTURA DE LOS SENSORES

La validación del funcionamiento de los sensores se hace de manera directa, al incorporar varios indicadores en la interfaz.

Así, uno de los indicadores muestra como el contador de los encoders aumenta cuando el motor gira en un sentido y como disminuye al girar en el sentido opuesto, tal y como se puede ver en la siguiente captura:

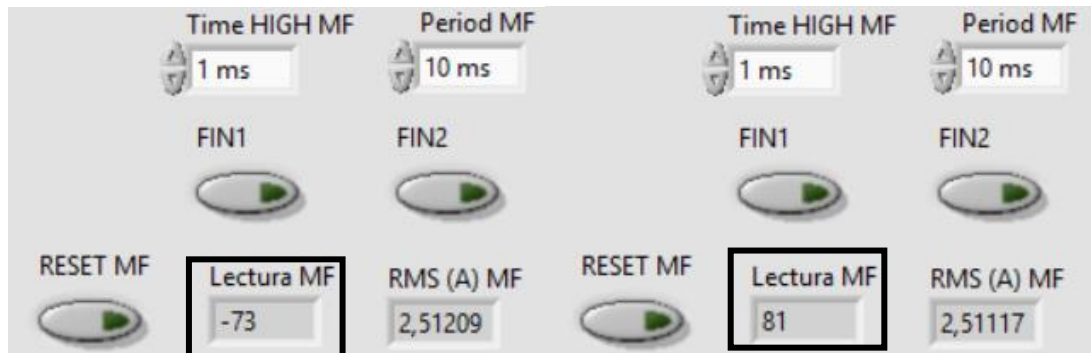


Figura 69: Variación del valor del contador de pulsos con el giro del motor en sentido antihorario (izq.) y horario (der.).

En cuanto a la lectura de la corriente, se debe tener en cuenta el comportamiento del sensor explicado en el apartado anterior. En teoría la señal generada por el sensor, centrada en 2,5 V, disminuye con el giro del motor en sentido antihorario y aumenta con el giro del motor en sentido horario. A continuación se muestran las lecturas obtenidas experimentalmente:

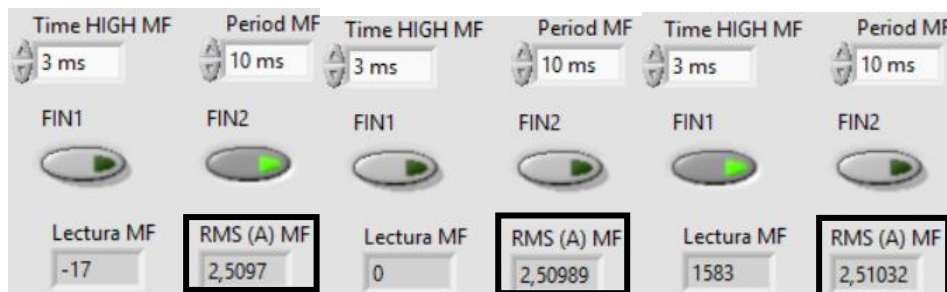


Figura 70: Variación del valor eficaz de la corriente con el giro del motor en sentido antihorario (izq.), con el motor parado (cent.) y con giro horario (der.).

Lo primero que se puede observar en la figura precedente es que la señal no está totalmente centrada en los 2,5 V. Además, también se puede ver que, aunque el comportamiento de la corriente sí que es el esperado, las variaciones de la señal son muy pequeñas (del orden de décimas de mV). Esto puede suponer un problema para el control de fuerza usando este sensor, ya que en ocasiones el ruido puede presentar picos del orden de decenas de milivoltios.

9. CONCLUSIÓN

Este proyecto se ha desarrollado bajo demanda del grupo de investigación de biomecánica de la UJI, formando parte del desarrollo de la plataforma PACMAR para el proyecto BENCH-HAND. Con este TFM, el grupo buscaba:

- Disponer de la electrónica necesaria para poder poner en marcha la plataforma PACMAR.
- Integrar toda esta electrónica en un circuito impreso que cupiera dentro de la caja de conexiones de la plataforma.
- Disponer de los programas en LabVIEW que les permitieran realizar los protocolos de ensayo para evaluar tanto la idoneidad de diferentes algoritmos de control avanzados como la capacidad de agarre de diferentes manos.
- Realizar pruebas iniciales de validación sobre la integración de todo el sistema mecatrónico.

En el momento en el que se termina el tiempo destinado a la realización de este proyecto, la plataforma se encuentra en la etapa de validación inicial, donde se ha comprobado el funcionamiento del circuito y de los programas que servirán de base para el desarrollo de los algoritmos de control.

Así, han quedado pendientes las etapas de programación y validación de los algoritmos de control y la de elaboración y validación de los protocolos de ensayo. Sin embargo, el grupo dispone de la documentación generada durante todo el proceso de desarrollo y de las herramientas necesarias para poder continuar con el proyecto e incluso para poder adjudicárselo fácilmente a otro ingeniero para finalizarlo.

Por otra parte, durante el desarrollo del proyecto se han detectado posibles mejoras con respecto a la solución inicial, que con el tiempo suficiente se podría considerar implementar en futuras versiones de la PACMAR.

La primera mejora que se puede aplicar es la sustitución de los sensores de corriente por otros que permitan obtener una medida más directa y fiable de la fuerza ejercida durante el agarre. Con respecto a este punto, en los últimos años han surgido diversos artículos que hablan sobre el control de fuerza basado en la adaptación de impedancia donde utilizan sensores de par [23] o incluso sensores de presión o deslizamiento [24].

En cuanto al circuito, éste ha sido diseñado teniendo en cuenta restricciones de fabricación y las limitaciones de espacio de la zona del chasis destinada a la electromecánica. Sin embargo, aunque el diseño final cumple con todas las restricciones del presente proyecto, en un futuro podría ser interesante minimizarlo para poder integrarlo directamente en las diferentes manos o incluso en alguna pieza intermedia. Esto permitiría prescindir del chasis de la PACMAR e incluso que un paciente amputado pudiera llegar a realizar los ensayos acoplado directamente el sistema al muñón.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Website proyecto BENCH-HAND. Disponible en: <https://sites.google.com/a/uji.es/bench-hand/home>.
- [2] Sancho-Bru, J. L. (2000). Model Biomecànic de la mà orientat al disseny d'eines manuals. Disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/10558>.
- [3] Llop-Harillo, I. (2017). Diseño, construcción y evaluación experimental de una mano antropomórfica accionada por cable.
- [4] Sospedra, B. (2017). Optimización del diseño de una mano mecánica antropomorfa fabricada con tecnología de impresión 3D para mejorar su capacidad de agarre.
- [5] Mathiowetz, V. G., Volland, G., Kashman, N., & Weber, K. (2008). Adult Norrills for the Box and Block Test of Manual Dexterity (hand evaluation, hand, motor skills, occupational therapy, tests). Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Adult-Norrills-for-the-Box-and-Block-Test-of-Manual-Mathiowetz-Volland/c5142c02ce06c25f09fec282dbec613b0e41a2ca>
- [6] Sollerman, C., Ejeskär, A. (1995). Sollerman Hand Function Test: A Standardised Method and its use in Tetraplegic Patients. Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery and Hand Surgery, 29(2), 167–176. Disponible en: <https://doi.org/10.3109/02844319509034334>
- [7] McDonnell, M. (2008). Action Research Arm Test. Australian Journal of Physiotherapy, 54(3), 220. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0004-9514\(08\)70034-5](https://doi.org/10.1016/S0004-9514(08)70034-5)
- [8] Light, C. M., Chappell, P. H., & Kyberd, P. J. (2002). Establishing a standardized clinical assessment tool of pathologic and prosthetic hand function: Normative data, reliability, and validity. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 83(6), 776–783. Disponible en: <https://doi.org/10.1053/apmr.2002.32737>
- [9] Lindner, H. Y. N., Nätterlund, B. S., & Hermansson, L. M. N. (2010). Upper limb prosthetic outcome measures: Review and content comparison based on International Classification of Functioning, Disability and Health. Prosthetics and Orthotics International, 34(2), 109–128. Disponible en: <https://doi.org/10.3109/03093641003776976>
- [10] Burger, H., Franchignoni, F., Heinemann, A., Kotnik, S., & Giordano, A. (2008). Validation of the orthotics and prosthetics user survey upper extremity functional status module in people with unilateral upper limb amputation. Journal of Rehabilitation Medicine, 40(5), 393–399. Disponible en: <https://doi.org/10.2340/16501977-0183>
- [11] Hermansson, L., Fisher, A., Bernspång, B., & Eliasson, A.-C. (2004). Assessment of Capacity for Myoelectric Control: a new rasch-built measure of prosthetic hand control. Journal of Rehabilitation Medicine. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/16501970410024280>
- [12] Bagley, A. M., Molitor, F., Wagner, L. V., Tomhave, W., & James, M. A. (2006). The Unilateral Below Elbow Test: a function test for children with unilateral congenital below elbow deficiency. Developmental Medicine & Child Neurology, 48(07), 569. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/S0012162206001204>

- [13] Llop-Harillo, I., & Pérez-González, A. (2017). System for the experimental evaluation of anthropomorphic hands. Application to a new 3D-printed prosthetic hand prototype. *International Biomechanics*, 4(2), 50–59. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/23335432.2017.1364666>
- [14] Calli, B., Walsman, A., Singh, A., Srinivasa, S., Abbeel, P., & Dollar, A. M. (2015). Benchmarking in Manipulation Research: The YCB Object and Model Set and Benchmarking Protocols. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MRA.2015.2448951>
- [15] EAGLE AUTODESK, Library Basics Part 1: Creating Your First Package in Autodesk EAGLE, Sam Sattel, ING, Versión de 2016. Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/library-basics-part-1-creating-first-package-autodesk-eagle/#eagle-navigation>
- [16] EAGLE AUTODESK, Library Basics Part 2: Creating Your First Symbol in Autodesk EAGLE, Sam Sattel, ING, Versión de 2016. Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/library-basics-part-2-creating-first-symbol-autodesk-eagle/>
- [17] EAGLE AUTODESK, Library Basics Part 3: Creating Your First Device in Autodesk EAGLE, ING, Versión de 2016. Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/library-basics-part-3-creating-first-device-autodesk-eagle/>
- [18] EAGLE AUTODESK, PCB Layout Basics Part 1: How to Place Your Components, ING, Versión de 2016. Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/pcb-layout-basics-component-placement/>
- [19] EAGLE AUTODESK, Routing & Autorouting – PCB Layout Basics 2, ING, Versión de 2016. Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/routing-autorouting-pcb-layout-basics-2/>
- [20] EAGLE AUTODESK, Design Rule Check: PCB Layout Basics 3, ING, Versión de 2016. Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/design-rule-check-pcb-layout-basics-3/>
- [21] National Instruments, Guía de Inicio para los Productos de NI, ESP, Versión del 01/04/2019. Disponible en: <http://www.ni.com/getting-started/esa/>
- [22] Delphine, L. (2018). Control of anthropomorphic hand using flex sensors in the neck.
- [23] Zhang, T., Jiang, L., Fan, S., Wu, X., & Feng, W. (2016). Development and experimental evaluation of multi-fingered robot hand with adaptive impedance control for unknown environment grasping. *Robotica*, 34(5), 1168–1185. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/S0263574714002161>
- [24] Zhang, T., Jiang, L., & Liu, H. (2018). Design and Functional Evaluation of a Dexterous Myoelectric Hand Prosthesis with Biomimetic Tactile Sensor. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(7), 1391–1399. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2844807>

ANEXOS A LA MEMORIA

Anexo I: Documento de especificaciones técnicas sensor de corriente LTSR 6-NP

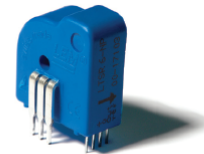


Current Transducer LTSR 6-NP

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic separation between the primary circuit and the secondary circuit.



$$I_{PN} = 6 \text{ At}$$



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal RMS current	6	At
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 ... $\pm 19.2^{1)}$	At
\hat{I}_P	Overload capability	250	At
V_{out}	Output voltage (analog) @ I_P	$2.5 \pm (0.625 \times I_P / I_{PN})$	V
	@ $I_P = 0$	$2.5^{2)}$	V
V_{ref}	Reference voltage (internal reference), Ref _{OUT} mode	$2.5^{3)}$	V
	Reference voltage (external reference), Ref _{IN} mode	1.9 ... $2.7^{4)}$	V
G	Sensitivity	104.16	mV/A
N_S	Number of secondary turns ($\pm 0.1\%$)	2000	
R_L	Load resistance	≥ 2	k Ω
C_{Lmax}	Maximum capacitive loading	500	pF
R_{IM}	Internal measuring resistance ($\pm 0.5\%$)	208.33	Ω
TCR_{IM}	Temperature coefficient of R_{IM}	< 50	ppm/K
U_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	5	V
I_C	Current consumption @ $U_C = 5 \text{ V}$	Typical $28 + I_S^{5)}$ (V_{out}/R_L)	mA

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.2	%
	Accuracy with R_{IM} , @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.7	%
ϵ_L	Linearity error	< 0.1	%
		Max	
TCV_{out}	Temperature coefficient of V_{out} / V_{ref} @ $I_P = 0$	-40 ... +85 °C 150	ppm/K
TCG	Temperature coefficient of G	-40 ... +85 °C 50 ⁶⁾	ppm/K
V_{OM}	Magnetic offset voltage @ $I_P = 0$		
	after an overload of $3 \times I_{PN}$	± 7	mV
	after an overload of $5 \times I_{PN}$	± 8	mV
	after an overload of $10 \times I_{PN}$	± 10	mV
TCV_{ref}	Temperature coefficient of V_{ref}		
	@ $I_P = 0$ -10 ... +85 °C	50	ppm/K
	-40 ... -10 °C	100	ppm/K
t_{ra}	Reaction time @ 10 % of I_{PN}	< 100	ns
t_r	Step response time to 90 % of I_{PN} ⁷⁾	< 400	ns
BW	Frequency bandwidth (0 ... -0.5 dB)	DC ... 100	kHz
	(-0.5 ... 1 dB)	DC ... 200	kHz

Notes: ¹⁾ Only in Ref_{OUT} mode or with external Ref less than 2.525 V and greater than 2.475 V. For external Ref_{OUT} of these limits see leaflet. ²⁾ V_{out} is linked to V_{ref} , by conception the difference between these two nodes for $I_P = 0$ is maximum $\pm 25 \text{ mV}$, $2.475 \text{ V} < V_{out} < 2.525 \text{ V}$. ³⁾ In Ref_{OUT} mode at $T_A = 25^\circ\text{C}$, $2.475 \text{ V} < V_{ref} < 2.525 \text{ V}$. The minimal impedance loading the ref pin should be $> 220 \text{ k}\Omega$. Internal impedance = 600Ω . For most applications you need to buffer this output to feed it into an A DC for example. ⁴⁾ To overdrive the Ref (1.9 V ... 2.7 V) max $\pm 1 \text{ mA}$ is needed. ⁵⁾ $I_S = I_P / N_S$. ⁶⁾ Only due to TCR_{IM} . ⁷⁾ For a $di/dt > 15 \text{ A}/\mu\text{s}$.

N° 97.54.09.000.0

22September2017/version 13

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without prior notice

Page 1/4

www.lem.com

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Unipolar supply voltage
- Insulating plastic case recognized according to UL 94-V0
- Compact design for PCB mounting
- Incorporated measuring resistance
- Extended measuring resistance
- Access to the internal voltage reference
- Possibility to feed the transducer reference from external supply.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

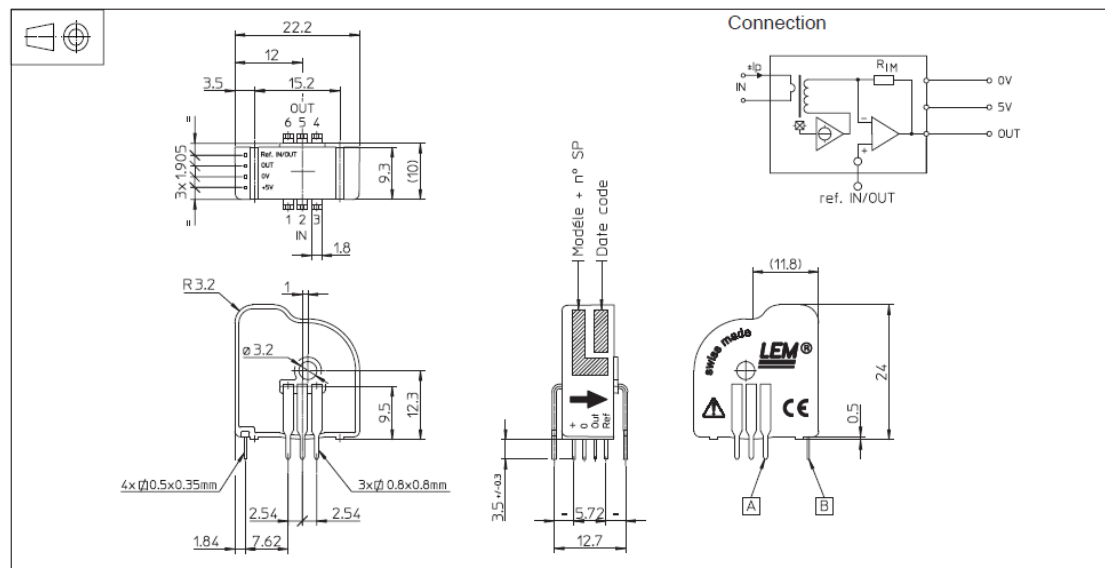
- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.


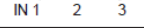
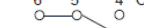
Application domain

- Industrial.



Dimensions LTSR 6-NP (in mm)



Number of primary turns	Primary nominal RMS current	Nominal output voltage V_{out}	Primary resistance R_p [mΩ]	Primary insertion inductance L_p [μH]	Recommended connections
1	±6	2.5 ±0.625	0.18	0.013	
2	±3	2.5 ±0.625	0.81	0.05	
3	±2	2.5 ±0.625	1.62	0.12	

Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
- Transducer fastening of primary Recommended PCB hole 6 pins 0.8×0.8 mm
1.3 mm
- Transducer fastening of secondary Recommended PCB hole 4 pins 0.5×0.35 mm
0.8 mm
- Primary through-hole $\varnothing 3.2$ mm

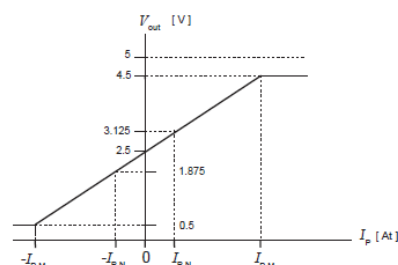
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

Note: ¹⁾ Output voltage when LTSP 6-NP is used with internal reference.

Remarks

- V_{out} swings above 2.5 V when I_p flows from terminals 1, 2, 3 to terminals 4, 5, 6 (with the arrow).
- Temperature of the primary conductor should not exceed 100 °C.
- Installation of the transducer must be done unless otherwise specified on the datasheet, according to LEM Transducer Generic Mounting Rules. Please refer to LEM document N°ANE120504 available on our Web site: [Products/Product Documentation](#).

Output voltage - Primary current



Micro Metal Gearmotors



Performance summary and table of contents

Motor Type	Rated Voltage	Pololu Item #	Gear Ratio	No Load		At Maximum Efficiency				Max Power	Stall Extrapolation		Graph Page
				Speed	Current	Speed	Torque	Current	Output		Torque	Current	
			:1	RPM	A	RPM	kg-mm	A	W	W	kg-mm	A	
Low-Power (LP 6V)	6 V	1100, 2200	4.995	2500	0.02						0.5	0.36	
		1099, 2201	9.96	1300							1.0		
		993, 2202	29.86	450		320	0.66	0.11	0.22	0.31	2.9		3
		1098, 2203	51.45	270		200	1.0	0.10	0.20	0.29	4.4		4
		2360, 2209	75.81	180		140	1.3	0.10	0.19	0.29	6.4		5
		992, 2204	100.37	130		100	1.7	0.10	0.17	0.25	7.4		6
		1097, 2205	150.58	90		67	2.6	0.11	0.18	0.25	11		7
		1096, 2206	210.59	65		46	4.1	0.12	0.19	0.25	16		8
		1095, 2207	248.98	54		39	4.2	0.11	0.17	0.23	17		9
		1094, 2208	297.92	45		34	4.4	0.09	0.15	0.22	20		10
		1596, 3058	986.41	13		10	12	0.09	0.12	*	55		11
Medium-Power (MP 6V)	6 V	2362, 2376	4.995	4400	0.04						0.6	0.67	
		2363, 2377	9.96	2200							1.1		
		2364, 2378	29.86	720		510	0.80	0.21	0.41	0.57	3.3		12
		2365, 2379	51.45	420		310	1.2	0.19	0.38	0.55	5.4		13
		2366, 2380	75.81	290		220	1.6	0.17	0.35	0.54	7.8		14
		2367, 2381	100.37	220		170	1.9	0.17	0.32	0.50	9.4		15
		2368, 2382	150.58	150		110	2.6	0.15	0.30	0.48	13		16
		2369, 2383	210.59	100		83	3.4	0.16	0.29	0.46	17		17
		2370, 2384	248.98	88		69	4.5	0.17	0.31	0.48	22		18
		2371, 2385	297.92	73		56	5.0	0.17	0.29	0.44	24		19
		2372, 3059	986.41	22		17	13	0.16	0.23	*	63		20
High-Power (HP 6V)	6 V	1000, 2210	4.995	6100	0.07						1.1	1.6	
		999, 2211	9.96	3100		2300	0.46	0.42	1.1	1.6	2.2		21
		1093, 2212	29.86	1000		830	1.0	0.36	0.89	1.5	5.7		22
		998, 2213	51.45	590		490	1.5	0.32	0.75	1.3	8.6		23
		2361, 2215	75.81	410		340	2.3	0.34	0.80	1.4	13		24
		1101, 2214	100.37	310		250	2.9	0.33	0.73	1.3	17		25
		997, 2386	150.58	210		170	3.9	0.31	0.68	1.2	24		26
		996, 2216	210.59	150		120	5.0	0.32	0.62	1.1	29		27
		995, 2217	248.98	120		100	5.5	0.30	0.59	1.1	34		28
		994, 2218	297.92	100		87	6.5	0.31	0.58	1.1	40		29
		1595, 2373	986.41	31		26	20	0.32	0.53	*	120		30
High-Power, Carbon Brushes (HPCB 6V)	6 V	3060, 3082	4.995	6500	0.10						0.9	1.5	
		3061, 3071	9.96	3300		2300	0.42	0.51	1.0	1.3	1.7		31
		3062, 3072	29.86	1100		840	1.0	0.43	0.85	1.2	4.5		32
		3063, 3073	51.45	650		490	1.6	0.42	0.80	1.2	7.4		33
		3064, 3074	75.81	430		330	2.5	0.43	0.87	1.3	11		34
		3065, 3075	100.37	330		260	3.3	0.44	0.86	1.3	16		35
		3066, 3076	150.58	220		170	4.1	0.39	0.73	1.1	20		36
		3067, 3077	210.59	160		120	5.9	0.40	0.74	1.1	28		37
		3068, 3078	248.98	130		100	6.6	0.40	0.71	1.1	32		38
		3069, 3079	297.92	110		85	7.4	0.42	0.65	1.0	34		39
		3070, 3080	986.41	33		26	22	0.39	0.59	*	110		40
High-Power, Carbon Brushes (HPCB 12V)	12 V	3036, 3047	4.995	6800	0.06						0.9	0.75	
		3037, 3048	9.96	3400		2500	0.43	0.25	1.1	1.5	1.7		41
		3038, 3049	29.86	1100		840	1.0	0.23	0.82	1.1	3.9		42
		3039, 3050	51.45	650		500	1.5	0.22	0.79	1.1	6.7		43
		3040, 3051	75.81	450		350	2.1	0.20	0.76	1.1	10		44
		3041, 3052	100.37	330		260	2.9	0.21	0.78	1.1	13		45
		3042, 3053	150.58	220		170	4.2	0.21	0.73	1.0	18		46
		3043, 3054	210.59	160		120	5.6	0.21	0.71	1.0	25		47
		3044, 3055	248.98	130		110	6.6	0.21	0.72	1.1	30		48
		3045, 3056	297.92	110		87	7.3	0.21	0.65	1.0	33		49
		3046, 3057	986.41	35		27	21	0.19	0.59	*	100		50

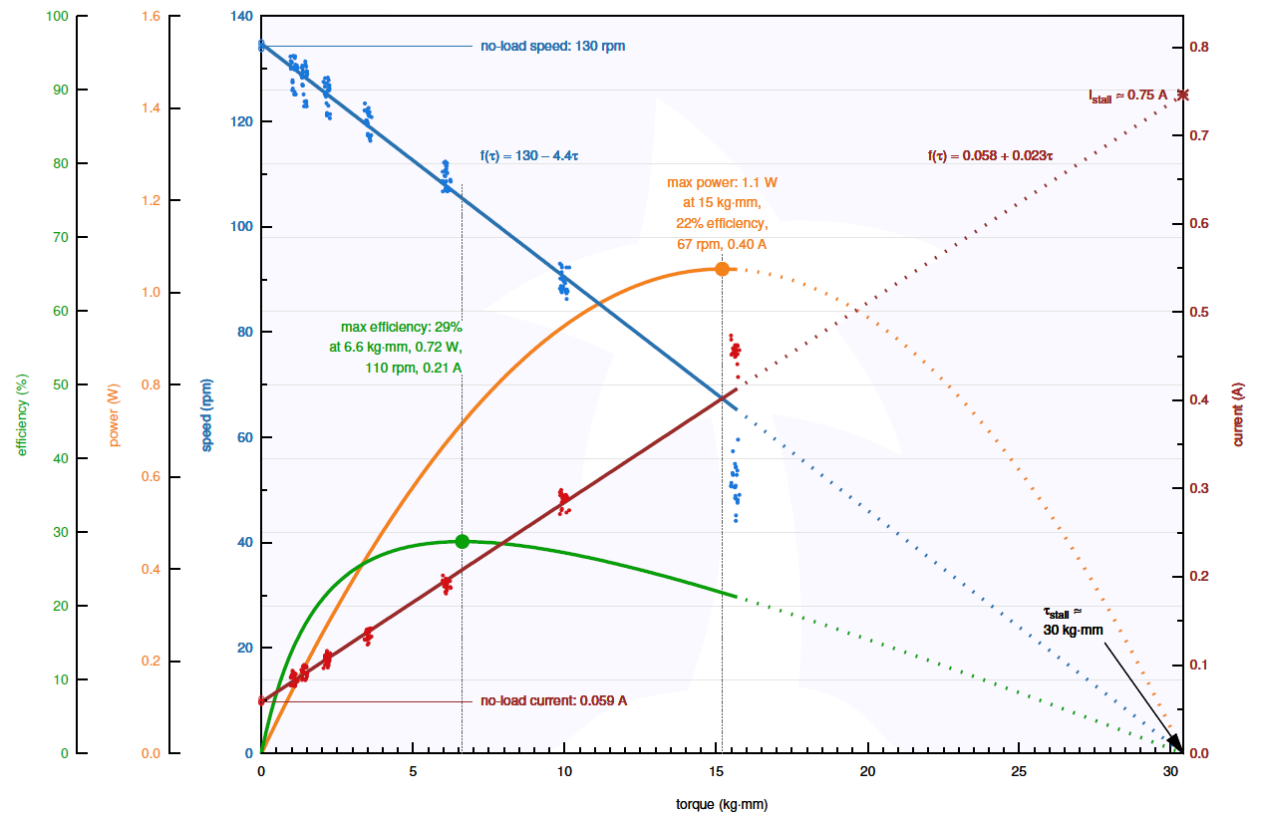
* Operating the 1000:1 gear ratios at maximum power is likely to damage the gearboxes.

Notes:

- 1) Max efficiency data and performance graphs currently unavailable for all 5:1 gear ratios and LP and MP 10:1 gear ratios.
- 2) Listed stall torques and currents are theoretical extrapolations; units will typically stall well before these points as the motors heat up. Stalling or overloading gearmotors can greatly decrease their lifetimes and even result in immediate damage. The recommended upper limit for instantaneous torque is 25 kg-mm for the 1000:1 gearboxes and 20 kg-mm for all other gear ratios; we strongly advise keeping applied loads well under these limits. Stalls can also result in rapid (potentially on the order of seconds) thermal damage to the motor windings and brushes, especially for the versions that use high-power (HP and HPCB) motors; a general recommendation for brushed DC motor operation is 25% or less of the stall current.

Desarrollo y puesta a punto de una plataforma de ensayos de manos protésicas antropomorfas y robóticas

Pololu Items #3044, #3055 (250:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 12V) Performance at 12 V



Anexo III: Documento de especificaciones técnicas Driver TB6612FNG

TOSHIBA

TB6612FNG

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristics	Symbol	Rating	Unit	Remarks
Supply voltage	V _M	15	V	
	V _{CC}	6		
Input voltage	V _{IN}	-0.2 to 6	V	IN1,IN2,STBY,PWM pins
Output voltage	V _{OUT}	15	V	O1,O2 pins
Output current	I _{OUT}	1.2	A	Per 1 ch
	I _{OUT} (peak)	2		tw = 20 ms Continuous pulse, Duty ≤ 20%
		3.2		tw = 10 ms Single pulse
Power dissipation	P _D	0.78	W	IC only
		0.89		50 mm × 50 mm t=1.6 mm Cu ≥ 40% in PCB mounting
		1.36		76.2 mm × 114.3 mm t=1.6 mm Cu ≥ 30% in PCB mounting
Operating temperature	T _{opr}	-20 to 85	°C	
Storage temperature	T _{stg}	-55 to 150	°C	

Operating Range (Ta=-20~85°C)

Characteristics	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit	Remarks
Supply voltage	V _{CC}	2.7	3	5.5	V	
	V _M	2.5	5	13.5	V	
Output current (H-SW)	I _{OUT}	—	—	1.0	A	V _M ≥ 4.5 V
		—	—	0.4		4.5 V > V _M ≥ 2.5 V Without PWM Operation
Switching frequency	f _{PWM}	—	—	100	kHz	

H-SW Control Function

Input				Output		
IN1	IN2	PWM	STBY	OUT1	OUT2	Mode
H	H	H/L	H	L	L	Short brake
L	H	H	H	L	H	CCW
		L	H	L	L	Short brake
H	L	H	H	H	L	CW
		L	H	L	L	Short brake
L	L	H	H	OFF (High impedance)		Stop
H/L	H/L	H/L	L	OFF (High impedance)		Standby

Anexo IV: Documento de especificaciones técnicas encoders magnéticos 12CPR

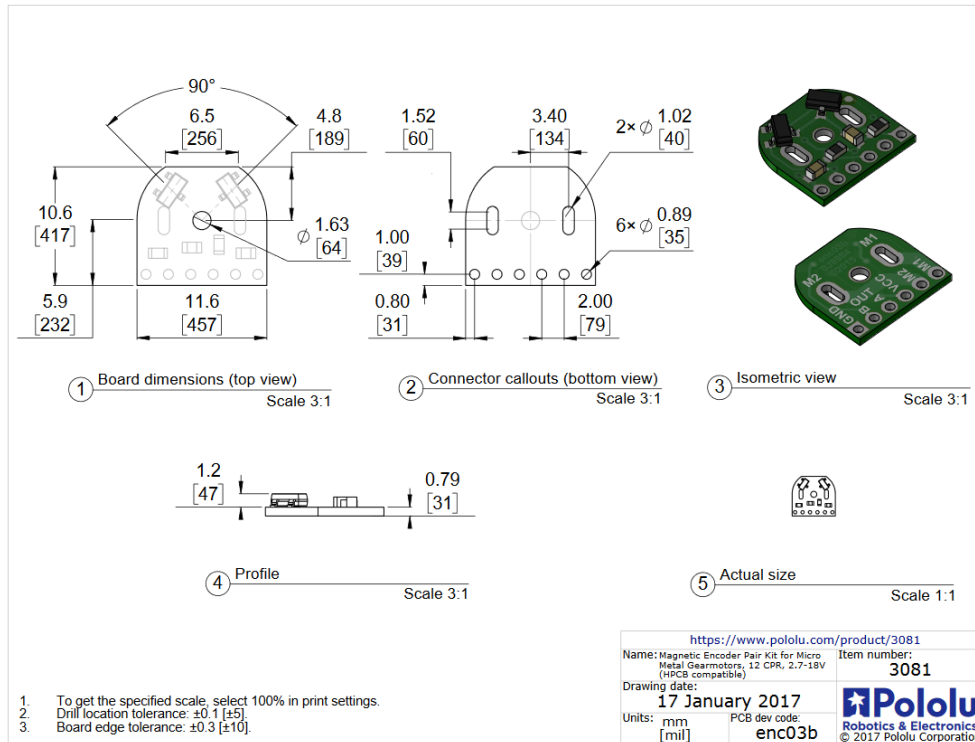


Table 1 Pin Description

Pin or Ball No.	Name	Pin Type	Function	Comments
1	Vs	I	Supply voltage	
2	Q	O	Output	
3	GND	I	Ground	

Table 2 Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note/Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Max. junction temperature	T_J	-40	—	150	°C	
		—	—	155		for 2000 h (not additive)
		—	—	165		for 1000 h (not additive)
		—	—	175		for 168 h (not additive)
		—	—	195		for 3 x 1 h (additive)
Supply voltage	V_{DD}	-18	—	18	V	
		-18	—	24		for 1h, $R_s \geq 200\Omega$
		-18	—	26		for 5min, $R_s \geq 200\Omega$
Supply current through protection device	I_S	- 50	—	+ 50	mA	
Output voltage	V_Q	-0.7	—	18	V	
		-0.7	—	26		for 5min @ 1.2k Ω pull up
Storage temperature	T_S	- 40	—	150	°C	
Magnetic flux density	B		—	unlimited	mT	
ESD robustness HBM: 1.5 k Ω , 100 pF	$V_{ESD,HBM}$	4			kV	According to EIA/JESD22-A114-B

3.2 Operating Range

The following operating conditions must not be exceeded in order to ensure correct operation of the TLE4946-2K. All parameters specified in the following sections refer to these operating conditions unless otherwise mentioned.

Table 3 Operating Range

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note/ Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Supply voltage	V_S	2.7	–	18	V	
Output voltage	V_Q	– 0.7	–	18	V	
Junction temperature	T_J	– 40	–	150	°C	
Output current	I_Q	0	–	20	mA	

3.3 Characteristics

Product characteristics involve the spread of values guaranteed within the specified voltage and ambient temperature range. Typical characteristics are the median of the production (at $V_S = 12V$ and $T_A = 25^\circ C$).

Table 4 Electrical Characteristics

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note/ Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Supply current	I_S	2	4	6	mA	$V_S = 2.7 V \dots 18 V$
Reverse current	I_{SR}	0	0.2	1	mA	$V_S = - 18 V$
Output saturation voltage	V_{QSAT}	–	0.3	0.6	V	$I_Q = 20 mA$
Output leakage current	I_{QLEAK}	–	0.05	10	μA	for $V_Q = 18 V$
Output fall time	t_f	–	0.02	1	μs	$R_L = 1.2 k\Omega$; $C_L = 50 pF$
Output rise time	t_r	–	0.4	1	μs	
Chopper frequency	f_{OSC}	–	320	–	kHz	
Switching frequency	f_{SW}	0	–	15 ¹⁾	kHz	
Delay time ²⁾	t_d	–	13	–	μs	
Output jitter ³⁾	t_{QJ}	–	1	–	μs_{RMS}	Typical value for square wave signal 1 kHz
Power-on time ⁴⁾	t_{PON}	–	13	–	μs	$V_S \geq 2.7 V$
Thermal resistance ⁵⁾	R_{thJA}	–	100	–	K/W	

1) To operate the sensor at the max. switching frequency, the value of the magnetic signal amplitude must be 1.4 times higher than for static fields.

This is due to the - 3 dB corner frequency of the low pass filter in the signal path.

2) Systematic delay between magnetic threshold reached and output switching

3) Jitter is the unpredictable deviation of the output switching delay

4) Time from applying $V_S \geq 2.7 V$ to the sensor until the output state is valid

5) Thermal resistance from junction to ambient

Anexo V: Documento de especificaciones técnicas CompactRIO 9049

Processor

CPU	Intel Atom E3940
Number of cores	4
CPU frequency	1.6 GHz (base), 1.8 GHz (burst)
On-die L2 cache	2 MB

Software




Note For minimum software support information, visit ni.com/info and enter the Info Code `swsupport`.

Supported operating system	NI Linux Real-Time (64-bit)
Supported C Series module programming modes	Real-Time (NI-DAQmx) Real-Time Scan (I/O Variables) LabVIEW FPGA
Application software	
LabVIEW ¹	LabVIEW 2017 or later, LabVIEW Real-Time Module 2017 or later, LabVIEW FPGA Module 2017 or later,
C/C++ Development Tools for NI Linux Real-Time ²	Eclipse Edition 2014 or later
Driver software	NI CompactRIO Device Drivers December 2017 or later

Network/Ethernet Port

Number of ports	2
Network interface	10Base-T, 100Base-TX, and 1000Base-T Ethernet
Compatibility	IEEE 802.3
Communication rates	10 Mb/s, 100 Mb/s, 1000 Mb/s auto-negotiated
Maximum cabling distance	100 m/segment


USB Ports

Port 1: 

Type	USB Type-A, host port
USB interface	USB 2.0, Hi-Speed
Maximum data rate	480 Mb/s
Maximum current	900 mA

Port 2:  

Type	USB Type-C, host port
USB interface	USB 3.1 Gen1, SuperSpeed
Maximum data rate	5 Gb/s
Maximum current	900 mA
Alternate modes	DisplayPort

Port 3: 

Type	USB Type-C, dual role port (device or host)
USB interface	USB 3.1 Gen1, SuperSpeed
Maximum data rate	5 Gb/s
Maximum current	900 mA

Memory

Nonvolatile (SSD)

Nonvolatile memory (SSD)	16 GB
Nonvolatile memory (SSD) type	Planar SLC NAND



Note Visit ni.com/info and enter the Info Code `ssdbp` for information about the life span of the nonvolatile memory and about best practices for using nonvolatile memory.

Volatile (DRAM)

Processor memory	
Density	4 GB
Type	DDR3L
Maximum theoretical data rate	12.8 GB/s

FPGA memory (DRAM)

Density	256 MB
Type	DDR3
Maximum theoretical data rate	1.6 GB/s

Digital Waveform

Waveform acquisition (DI) FIFO

Parallel modules	255 samples per slot
Serial modules	127 samples per slot

Waveform onboard regeneration (DO) FIFO

Parallel modules	
Slots 1 to 4	2,047 samples shared among slots used
Slots 5 to 8	1,023 samples shared among slots used

Waveform streaming (DO) FIFO

Parallel modules	255 samples per slot
Serial modules	127 samples per slot

Sample clock frequency

Digital input	0 MHz to 10 MHz
Digital output	
ot0:6 timing engine	0 MHz to 3.5 MHz
ot7 timing engine	0 MHz to 10 MHz



Note Streaming applications are limited by system-dependent factors and the capability of C Series modules.

Timing accuracy	50 ppm
Number of digital input hardware-timed tasks	8
Number of digital output hardware-timed tasks	8

CMOS Battery

Typical battery life with power applied to power connector	10 years
Typical battery life when stored at temperatures up to 25 °C	7.8 years
Typical battery life when stored at temperatures up to 85 °C	5.4 years

Anexo VI: Documento de especificaciones técnicas fuente FA-665B



FUENTE DE ALIMENTACIÓN DOBLE 2 X 0 A 30 V / 5 A Y AUXILIAR 5 V / 3 A

FA-665B Fuente doble 2 x 0 a 30 V / 5 A y auxiliar 5 V / 3 A

La fuente de alimentación **FA-665B** proporciona dos salidas variables de tensión entre 0 y 30 V simétricas y una corriente hasta 5 A. Todas las salidas están perfectamente protegidas contra cortocircuitos en cualquier ajuste de control ya que la corriente máxima que puede proporcionar es ajustable internamente.

Las fuentes variables pueden funcionar de forma independiente, modo serie para alcanzar los 60 V y modo paralelo para poder entregar 10 A.

La fuente de alimentación doble tiene cuatro displays que permiten al usuario leer la tensión y corriente de forma simultánea.

Se ha incorporado un interruptor de corte de salida para parar la alimentación de los circuitos bajo prueba sin tener que modificar los ajustes de los mandos. Gracias a esta aplicación, la **FA-665B** está especialmente indicada para laboratorios, centros de reparación y mantenimiento así como para centros educativos.



Especificaciones	FA-665B	Salida Fija	
Salida variable 1 Tensión Corriente Regulación de red Regulación de carga Ruido y rizado	0 ± 30 V 0 ~ 5 A CV $1 \times 10^{-4} + 3$ mV CC $2 \times 10^{-3} + 3$ mA CV $1 \times 10^{-4} + 4$ mV CC $2 \times 10^{-3} + 5$ mA CV 1 mV rms CC 3 mA rms	Tensión	0 ~ 5 V
		Corriente	0 ~ 3 A
		Regulación de red	1 %
		Regulación de carga	1 %
		Ruido y rizado	5 mV rms
salida variable 2 Tensión Corriente Regulación de red Regulación de carga Ruido y rizado	0 ± 30 V 0 ~ 5 A CV $1 \times 10^{-4} + 3$ mV CC $2 \times 10^{-3} + 3$ mA CV $1 \times 10^{-4} + 4$ mV CC $2 \times 10^{-3} + 5$ mA CV 1 mV rms CC 3 mA rms	Resolución de lectura	
		Tensión	± (0,2 % Rgd + 2 dígitos)
		Corriente	± (1,0 % Rgd + 2 dígitos)
		Alimentación	
		Tensión	110 ~ 127 V AC ± 10% 220 ~ 240 V AC ± 10% (seleccionable)
		Características mecánicas	
		Dimensiones	260 (A.) x 160 (Al.) x 340 (Pr.) mm
		Peso	10 kg



PROMAX ELECTRONICA, S. L.

Francesc Moragas, 71 * 08907 L'HOSPITALET DE LLOBREGAT * BARCELONA * SPAIN

Tel: (+34) 93 184 77 05 * Fax: (+34) 93 338 11 26 * e-mail: promax@promax.es * http://www.promax.es

Anexo VII: Pseudocódigo de los programas en LabVIEW

Programa PWM

```
1  while TRUE //La frecuencia del bucle debe ser de 1 kHz
2      if IN1 == HIGH
3          entrada AIN1 del DriverTB6612FNG = HIGH
4      else
5          entrada AIN1 del DriverTB6612FNG = LOW
6      end
7      if IN2 == HIGH
8          entrada AIN2 del DriverTB6612FNG = HIGH
9      else
10         entrada AIN2 del DriverTB6612FNG = LOW
11     end
12     for (i = 0; i < Period; i++)
13         for (j = 0; j < Time HIGH; j++)
14             entrada PWMA del DriverTB6612FNG = HIGH
15         end
16         entrada PWMA del DriverTB6612FNG = LOW
17     end
18 end
```

Programa de lectura del encoder

```
1  while TRUE //La frecuencia del bucle debe ser de 1 MHz
2      if detección de flanco ascendente del CHA del Encoder12CPR && CHB del Encoder12CPR == LOW
3          Contador = Contador + 1;
4      end
5      if detección de flanco ascendente del CHB del Encoder12CPR && CHA del Encoder12CPR == HIGH
6          Contador = Contador - 1;
7      end
8      if Reset == TRUE
9          Contador = 0;
10     end
11 end
```

Programa de lectura del sensor de corriente

```
1  while TRUE //La frecuencia del bucle debe ser de 1 kHz
2      for (i = 0; i < 10; i++)
3          Vector(i) = Salida + del SensorLTSR6NP - Salida 0 del SensorLTSR6NP;
4          Vector(i) = (Vector(i) - 2.5) * 3.2;
5      end
6      RMS(A) = 0;
7      for (i = 0; i < 10; i++)
8          RMS(A) = RMS(A) + (Vector(i)^2);
9      end
10     RMS(A) = RMS(A) * 1/10;
11 end
```

PLIEGO DE CONDICIONES

1. CONDICIONES GENERALES

1.1. OBJETO

La finalidad de este Pliego de Condiciones es la de fijar los criterios de la relación que se establece entre la empresa contratante y el encargado del desarrollo del proyecto.

1.2. DOCUMENTOS QUE DEFINEN EL PROYECTO

Los siguientes documentos son los que fijan las especificaciones que se deben respetar en el presente proyecto. Estos son:

- El presente Pliego de Condiciones
- La documentación gráfica y escrita que acompaña al resultado del Proyecto: la Memoria (junto con sus anexos), el Pliego de condiciones y el Presupuesto.

Frente a posibles discrepancias, y si no se especifica otra cosa, el orden de prioridad de los documentos es el siguiente:

- I. Pliego de condiciones
- II. Presupuesto
- III. Memoria

1.3. CONDICIONES FACULTATIVAS

En la consecución final de este Trabajo de Final de Máster intervienen las siguientes personas físicas o jurídicas:

- **Proyectista:** Es el autor del TFM, quien está al cargo de la concepción, gestión, desarrollo del proyecto de puesta a punto de la plataforma de ensayos.
- **Promotor:** Es quien adquiere los servicios del proyectista y los derechos sobre la explotación del proyecto. En este caso se trata del Grupo de Investigación de Biomecánica de la Universitat Jaume I.

1.4. CONDICIONES DEL CONTRATO DEL PROYECTISTA

El contrato del proyectista ha sido financiado por la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte a través de una subvención del Programa para la promoción de la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación en la Comunidad Valenciana.

El objeto de esta subvención es financiar la contratación de personal investigador de carácter predoctoral, cuya regulación específica se establece en los artículos 25 al 32 de las bases reguladoras, las cuales se encuentran incluidas en el Programa operativo del Fondo Social Europeo 2014-2020 de la Comunidad Valenciana.

La subvención anual para cada uno de los contratos predoctorales es de 22.192,80 euros y se destina necesariamente a financiar el salario y la cuota empresarial de la Seguridad Social de los investigadores contratados durante cada una de las anualidades, consideradas independientemente. La retribución salarial mínima que deben recibir los investigadores en formación durante este periodo, que se debe indicar en cada contrato, es de 16.800 euros brutos anuales

1.5. ACCIDENTES DE TRABAJO

Las disposiciones mínimas de seguridad y salud del puesto se establecen en el artículo 18.1 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, y de acuerdo con lo establecido en la Política de Prevención de Riesgos de la UJI.

Por otra parte, la cobertura se aplica en los accidentes ocurridos:

- Dentro de las instalaciones de la empresa y en horario laboral.
- En el contexto de una misión confiada por la entidad contratadora.

1.6. CONDICIONES GENERALES DE EXPLOTACIÓN

El Grupo de Investigación de Biomecánica conservará la propiedad intelectual integral de los elementos constitutivos de la plataforma de ensayos desarrollada en este proyecto y será libre de hacerlos evolucionar en función de sus necesidades. Estos elementos incluyen- sin limitarse- los ficheros de todo software o aplicación destinada a hacer funcionar la plataforma a excepción de las librerías de terceros, así como los originales del diseño del circuito y todos los documentos que acompañan al resultado del proyecto.

1.7. NORMATIVA

Todos los elementos suministrados, estarán de acuerdo con las normas UNE, UIC, CEI, DIN, NF. Se permitirá la utilización de normas específicas, siempre y cuando éstas sean equivalentes a las indicadas. Dicha equivalencia y las nuevas normas utilizadas deberán ser entregadas en el desarrollo del Trabajo.

En cada documento las especificaciones literales prevalecen sobre las gráficas y en los planos la cota prevalece sobre la medida a escala.

1.8. PLAZOS Y CONDICIONES GENERALES DEL PROYECTO

La ejecución del presente Trabajo Final de Máster viene marcada por la planificación que el grupo de investigación del proyecto BENCH-HAND realiza sobre el mismo. Los cambios de plazos de ejecución del Trabajo se llevan a cabo de mutuo acuerdo con el proyectista.

1.9. RESPONSABILIDAD DEL PROYECTISTA

El proyectista debe asumir desde la firma del contrato todas las responsabilidades descritas en este apartado:

- Debe comprometerse a concluir el Trabajo bajo las condiciones fijadas.
- Debe garantizar la ejecución del Trabajo conforme a lo establecido en sus documentos, proporcionando el nivel de calidad adecuado de gestión del proyecto y del producto final.
- Debe observar el cumplimiento de las normas a que queda sujeto el Trabajo.

2. CONDICIONES PARTICULARES

2.1. CONDICIONES DEL SOFTWARE UTILIZADO

En lo referente a las especificaciones de software, hay que tener en cuenta las diferentes versiones de los programas utilizados para el desarrollo de este proyecto:

- La versión de EAGLE utilizada es la v 9.3.
- La versión de LABView utilizada es la versión 18.0.
- El sistema operativo a emplear es el Windows 10.

2.2. DOSSIER TÉCNICO

Una vez finalizado el proyecto, una serie de documentos técnicos deben ser facilitados al promotor como parte de la solución final. Este dossier técnico está compuesto de:

- Un esquema del cableado del sistema
- Los ficheros fuente y los ejecutables de los programas necesarios para la utilización de la plataforma
- Un documento de arquitectura del sistema conteniendo una descripción de todos los elementos electrónicos y de software

3. CONDICIONES DE SUMINISTRO

3.1. ESPECIFICACIÓN DE MATERIALES

Las consideraciones que deben cumplir los materiales y componentes que componen los diferentes elementos de la PACMAR se detallan a continuación:

- El chasis de soporte debe estar fabricado en aluminio.
- La brida de anclaje y su tapa deben ser de acero inoxidable.
- Para los soportes para la mano y para la electromecánica se recomienda utilizar piezas impresas en 3D en base de PLA o ABS.
- La placa para el circuito impreso se recomienda que sea de cobre con una capa de resina epoxi con fibra de vidrio fotorresistente.

3.2. ESPECIFICACIONES PARA LA ADQUISICIÓN DE COMPONENTES

A continuación se recogen las referencias comerciales y los proveedores recomendados para la adquisición de los componentes de la PACMAR:

Concepto	Designación	Ref.	Proveedor
Componentes electrónicos	Micromotor HPCB 12V 250:1 con doble eje	3055	Pololu
	Driver TB6612FNG Pololu	DCM-0032	Bricogeek
	Encoder magnético 12 CPR 2.7-18V	RUE-0010	Bricogeek
	Sensor de corriente LTSR 6-NP	LTSR 6-NP	Farnell
	Resistencia 330kΩ	1700270	Farnell
	Placa de prototipado fotorresistente 160x100	141300	Farnell
Conectores	Conector DuPont 1x6	CPM-0096	Bricogeek
	Conectores DuPont 1x4	CPM-0095	Bricogeek
	Conectores DuPont 1x1	CPM-0092	Bricogeek
	Conector Dupont 1x3	CPM-0094	Bricogeek
	Conector Dupont 1x2	CPM-0093	Bricogeek
	Crim Pin - Macho	CPM-0100	Bricogeek
	Conector DSUB 37 pines	1084704	Farnell

Tabla 6: Referencias comerciales de los componentes de la PACMAR.

3.3. ESPECIFICACIONES DE EJECUCIÓN

A continuación, se enumeran los pasos que hay que seguir, en el orden especificado, para poder utilizar la PACMAR:

1. Comprobar el estado de todas las conexiones del circuito impreso (ver Figura 33 de la Memoria). Además, se deben revisar que la alimentación del CompactRIO (V1,C y masa conectados) y el cable de comunicación con el ordenador (por USB o cable de red en la entrada 1) estén bien conectados (ver Figura 71).

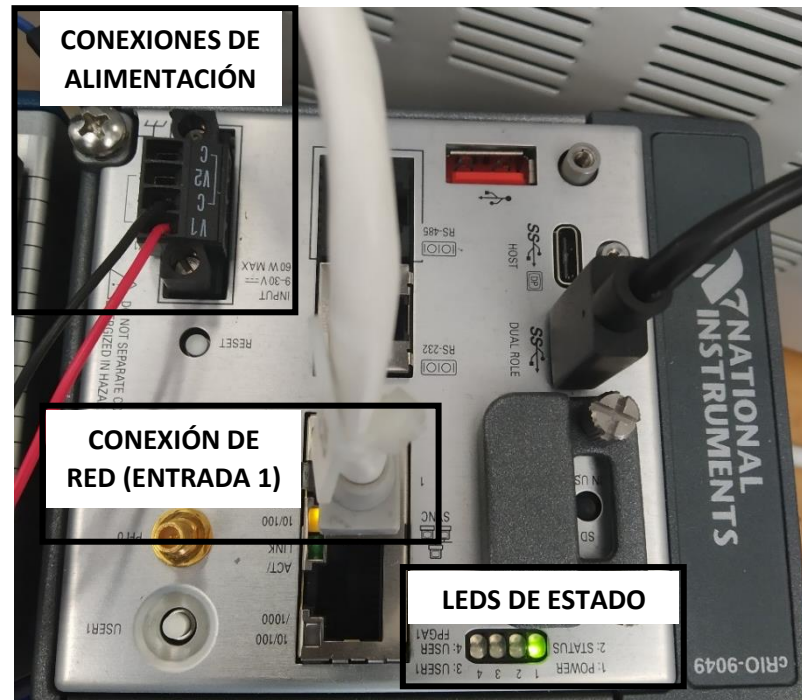


Figura 71: Chasis CompactRIO.

2. Poner en marcha la alimentación del sistema, asegurándose de que las dos salidas de alimentación estén a los niveles de tensión correspondientes y de que el sistema disponga de suficiente corriente (ver apartado 7.3. ALIMENTACIÓN).
3. Esperar a que arranque el CompactRIO. El led STATUS debe pasar de encendido en naranja a apagado y el led POWER debe quedarse encendido en amarillo (ver Figura 71).
4. Una vez el CompactRIO está en marcha, se puede abrir el archivo “**Programa PACMAR.lvproj**”. Éste contiene la interfaz para ejecutar el programa de control de la PACMAR. Para cargar el programa en el CompactRIO, basta con pulsar sobre el icono RUN en la ventana de interfaz (ver Ilustración 2).

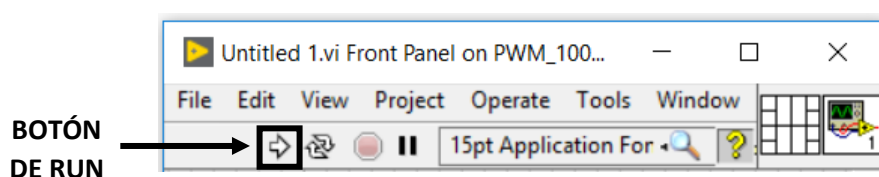


Figura 72: Barra de opciones interfaz LabVIEW.

4. RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD

Algunos componentes electrónicos de la plataforma PACMAR como los sensores de corriente, los motores y los drivers funcionan con una corriente muy alta que puede ser peligrosa para las personas. Por esta razón, se recomienda aislar el circuito para que no sea accesible para los usuarios de la PACMAR y en caso de necesitar manipular algún componente, hacerlo siempre con la alimentación cortada.

PRESUPUESTO

1. HONORARIOS DE INGENIERO

El contrato establecido es el de personal investigador de la UJI, con un total de 37,5 horas semanales. Además, la duración del proyecto es de 22 semanas, que se corresponden con cinco meses.

Dado que el salario especificado por el contrato es de 8,57 €/h, el cálculo del coste de mano de obra sería:

Concepto	Precio unitario (€)	Nº Unidades	Total (€)
Coste por hora del ingeniero	8,57	825	7070,25

Tabla 7: Honorarios del ingeniero.

2. AMORTIZACIONES

2.1. AMORTIZACIÓN DEL HARDWARE

Para el cálculo de la amortización del hardware, se considera el tiempo de utilización del mismo durante el desarrollo del proyecto. El coste se calcula según la siguiente expresión:

$$\text{Amortización} = \text{Precio} \times \frac{\text{Tiempo de uso (meses)}}{12 \text{ meses/año}} \times \frac{1}{\text{Vida útil (años)}}$$

El coste de amortización de los distintos elementos de hardware utilizados queda recogido en la siguiente tabla:

Concepto	Precio (€)	Vida útil (años)	Coste de amortización (€)
Portátil dedicado	449,00	6	31,18
CompactRIO 9049	6623,10	10	275,96
Módulo NI9205	819,00	10	34,10
Módulo NI9403	402,30	10	16,76
Total			358,00

Tabla 8: Coste de amortizaciones del hardware.

2.2. AMORTIZACIÓN DEL SOFTWARE

Para el cálculo de amortización del Software, se considera un periodo de renovación de licencia de 1 año, y se considera que el coste de amortización asumible a la realización del proyecto se debe a todo el período de realización del trabajo.

El coste de las aplicaciones utilizadas queda recogido en la siguiente tabla:

Concepto	Precio (€)
Microsoft Office	149,00
LabVIEW v.18.0	871,50
SolidWorks	4100,00
EAGLE v.9.3	-
Total	5120,50

Tabla 9: coste de amortizaciones de software.

A partir del coste anual de las licencias, se calcula el coste de amortización durante el periodo de desarrollo del proyecto:

$$\text{Amortización del software} = 5120,50 \times \frac{5}{12} \times \frac{1}{1} = 2133,54 \text{ €}$$

2.3. COSTE TOTAL AMORTIZACIONES

Concepto	Precio (€)
Amortización del Hardware	358,00
Amortización del Software	2133,54
Total	2491,54

Tabla 10: Coste total amortizaciones.

3. COSTE DEL MATERIAL

Concepto	Designación	Precio unitario (€)	Nº Unidades	Total (€)
Componentes electrónicos	Micromotor HPCB 12V 250:1 con doble eje	16,87	6	101,19
	Driver TB6612FNG Pololu	5,99	3	17,97
	Encoder magnético 12 CPR 2.7-18V	10,29	6	61,74
	Sensor de corriente LTSR 6-NP	12,46	6	74,76
	Resistencia 330kΩ	0,0243	6	0,15
	Placa de prototipado fotorresistente 160x100	8,72	1	8,72
Conectores	Conector DuPont 1x6	0,10	6	0,6
	Conectores DuPont 1x4	0,09	5	0,45
	Conectores DuPont 1x1	0,03	9	0,27
	Conector Dupont 1x3	0,04	6	0,24
	Conector Dupont 1x2	0,03	3	0,09
	Crim Pin - Macho	0,08	89	7,12
	Conector DSUB 37 pines	1,05	1	1,05
			TOTAL	274,35

Tabla 11: Coste del material.

4. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

4.1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

La tabla siguiente recoge los costes calculados en los apartados anteriores, que constituyen el presupuesto de ejecución material del proyecto:

Concepto	Precio (€)
Horarios del Ingeniero	7070,25
Amortizaciones	2491,54
Coste Material	274,35
Total	9836,14

Tabla 12: Presupuesto de ejecución material (PEM).

4.2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

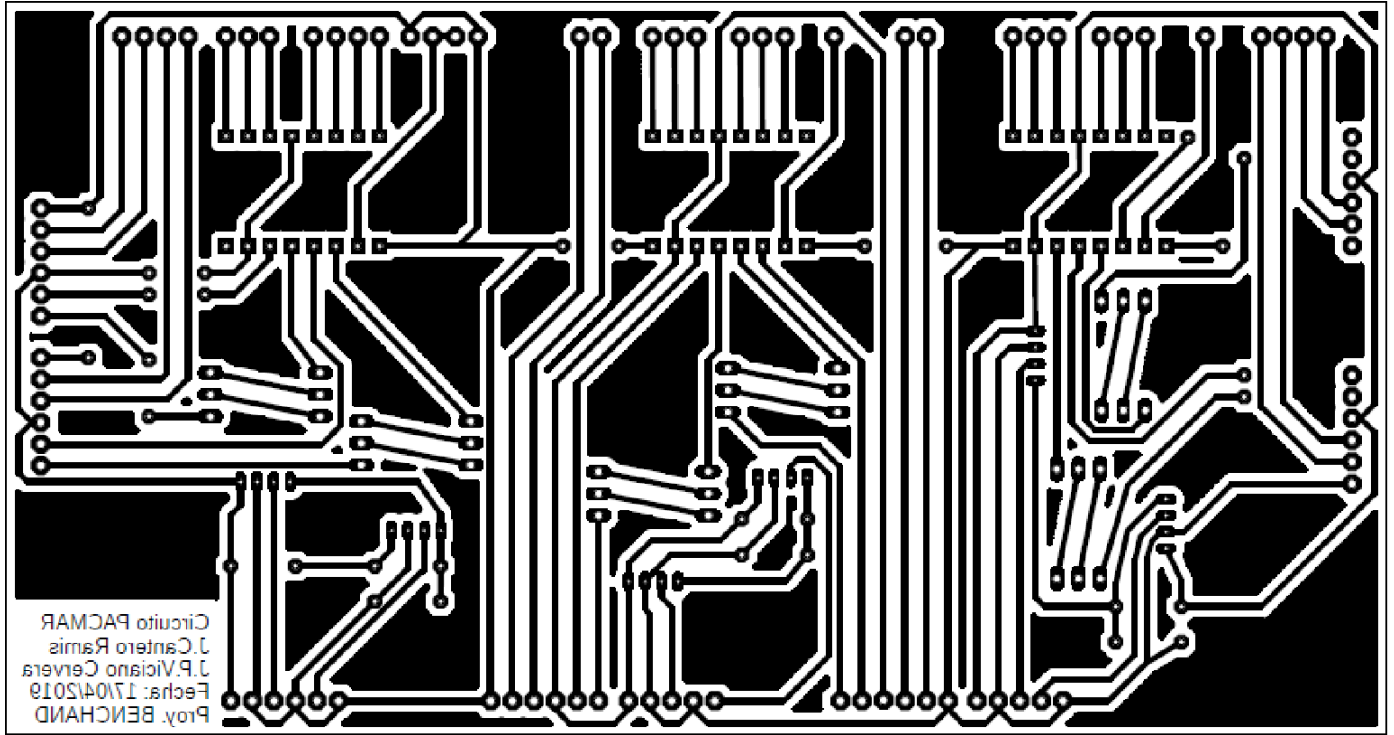
El presupuesto de ejecución por contrata se obtiene añadiendo al coste del apartado anterior el tanto por ciento en concepto de Gastos Generales:


Concepto	Precio (€)
PEM	9836,14
Gastos Generales (12%)	975,34
Total	10811,48

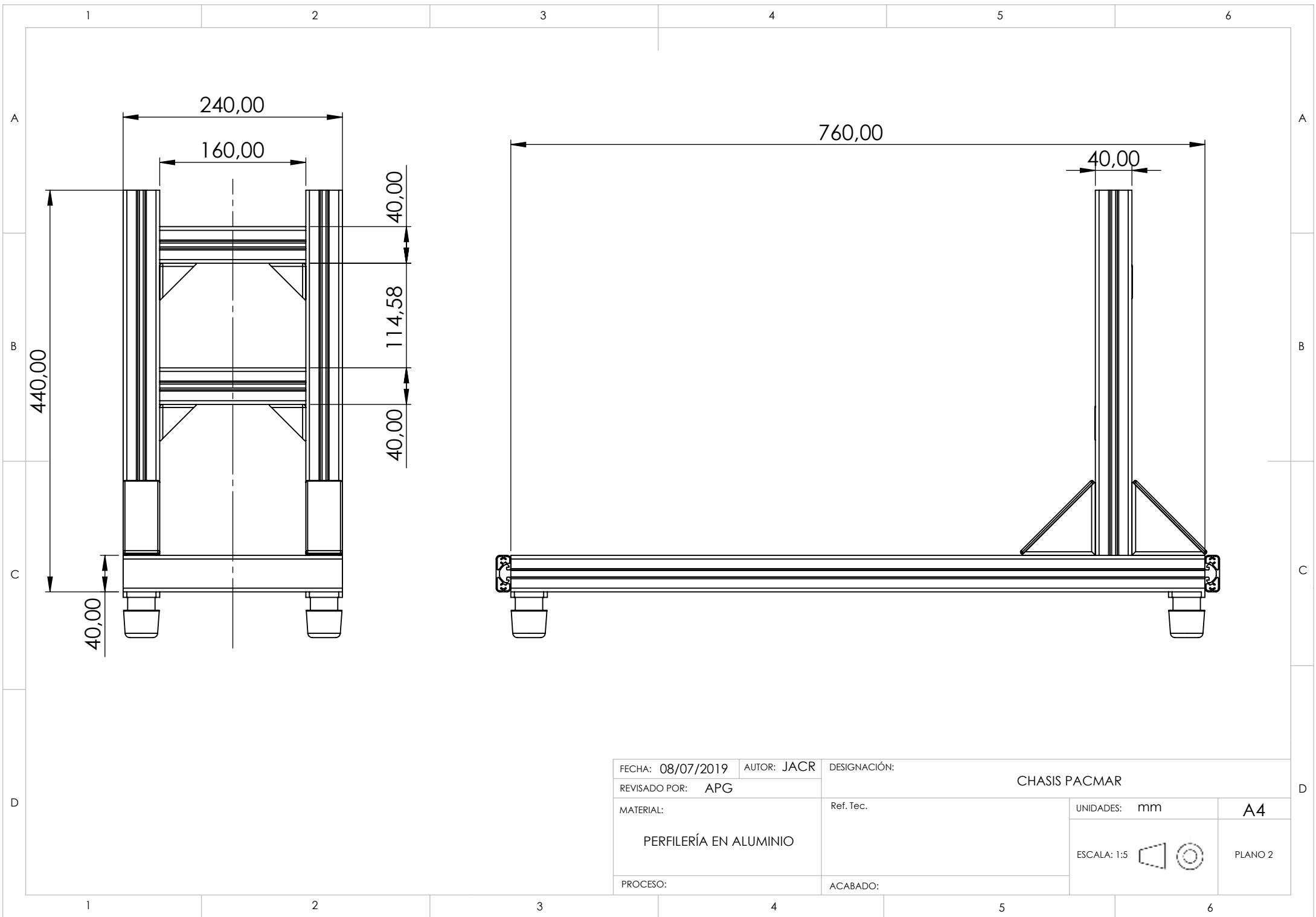
Tabla 13: Presupuesto de ejecución por contrata (PEC).

PLANOS

1. Plano 1: Negativo del circuito impreso para fotolito
2. Plano 2: Chasis de soporte de la PACMAR
3. Plano 3: Brida de anclaje y tapa de la brida de anclaje
4. Plano 4: Soporte adaptado para la Imma Hand
5. Plano 5: Soporte para los motores de la PACMAR
6. Plano 6: Pieza de fijación para los motores

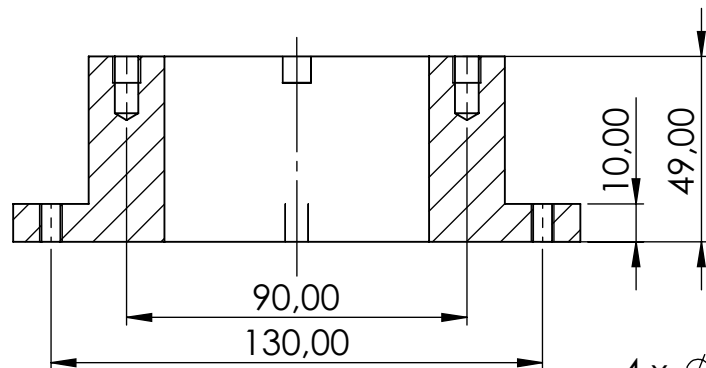


FECHA: 27/06/2019	AUTOR: JACR	DESIGNACIÓN:	CIRCUITO IMPRESO	
REVISADO POR: APG				
MATERIAL:		Ref. Tec.	UNIDADES: mm	A4
PLACA CON RECUBRIMIENTO FOTORRESISTENTE			ESCALA: 1:1	PLANO 1
PROCESO: IMPRESIÓN FOTOLÍTICA		ACABADO:		



FECHA: 08/07/2019	AUTOR: JACR	DESIGNACIÓN: CHASIS PACMAR		
REVISADO POR: APG			UNIDADES: mm	A4
MATERIAL: PERFILERÍA EN ALUMINIO	Ref. Tec.		ESCALA: 1:5	PLANO 2
PROCESO:	ACABADO:			

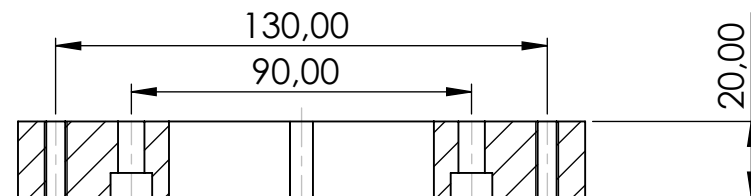
BRIDA DE ANCLAJE



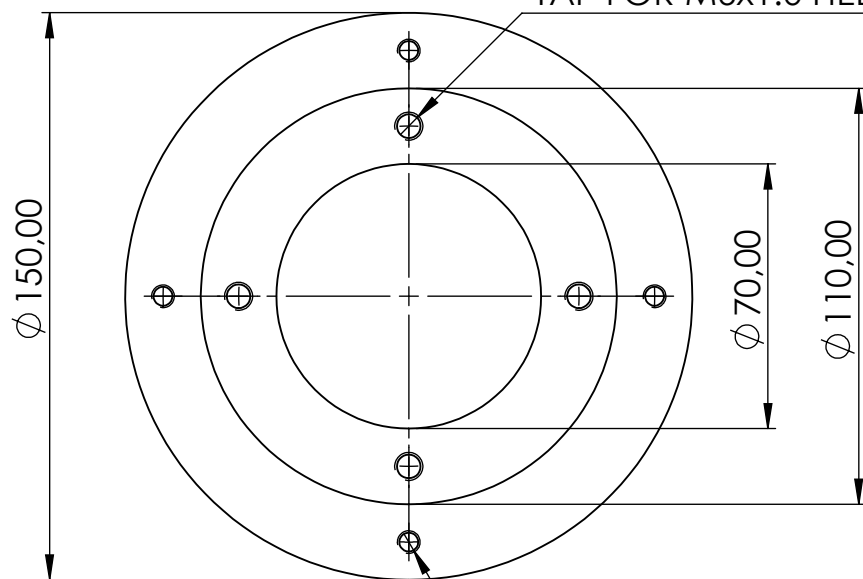
4 x \varnothing 6,25 ∇ 15,00

TAP FOR M6x1.0 HELICOIL Insert = 1.0 * Dia.

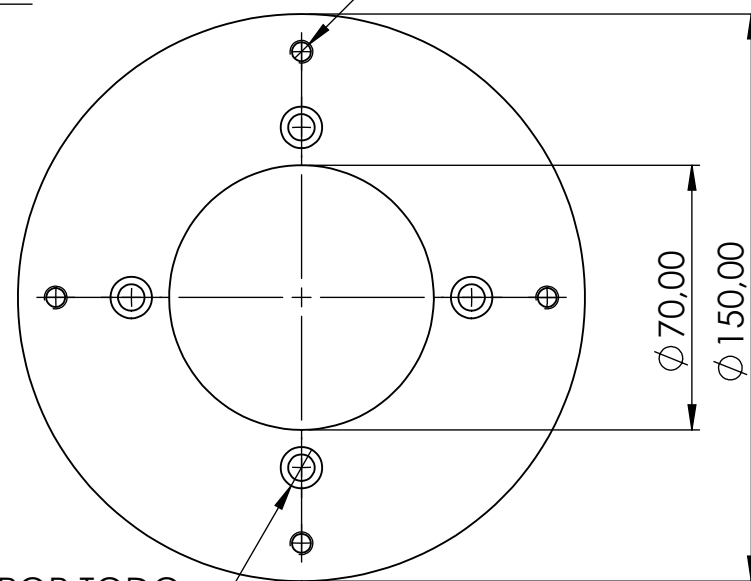
TAPA DE LA BRIDA DE ANCLAJE



4 x \varnothing 5,00 POR TODO
M6 - 6H POR TODO

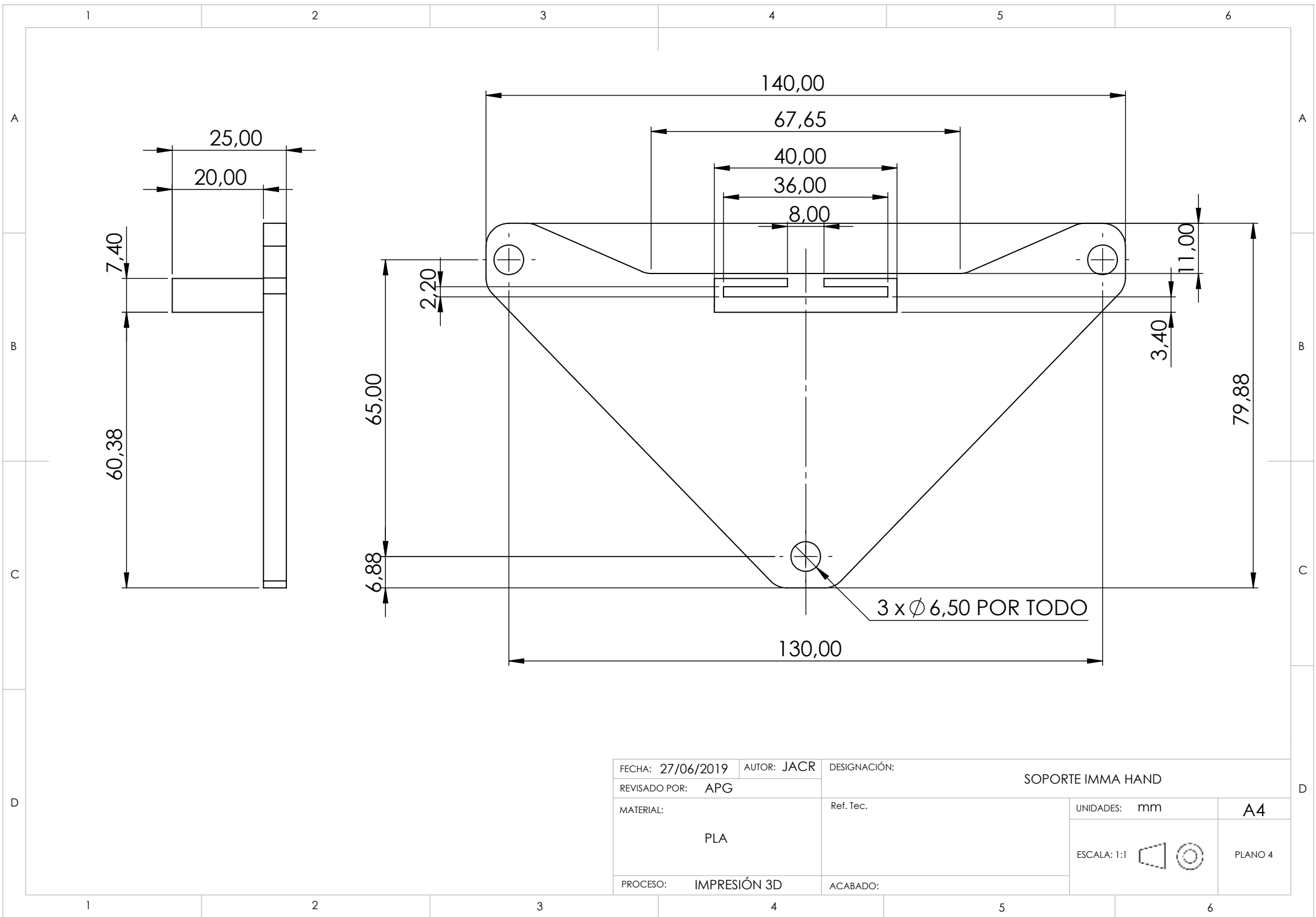


4 x \varnothing 5,00 POR TODO
M6 - 6H POR TODO

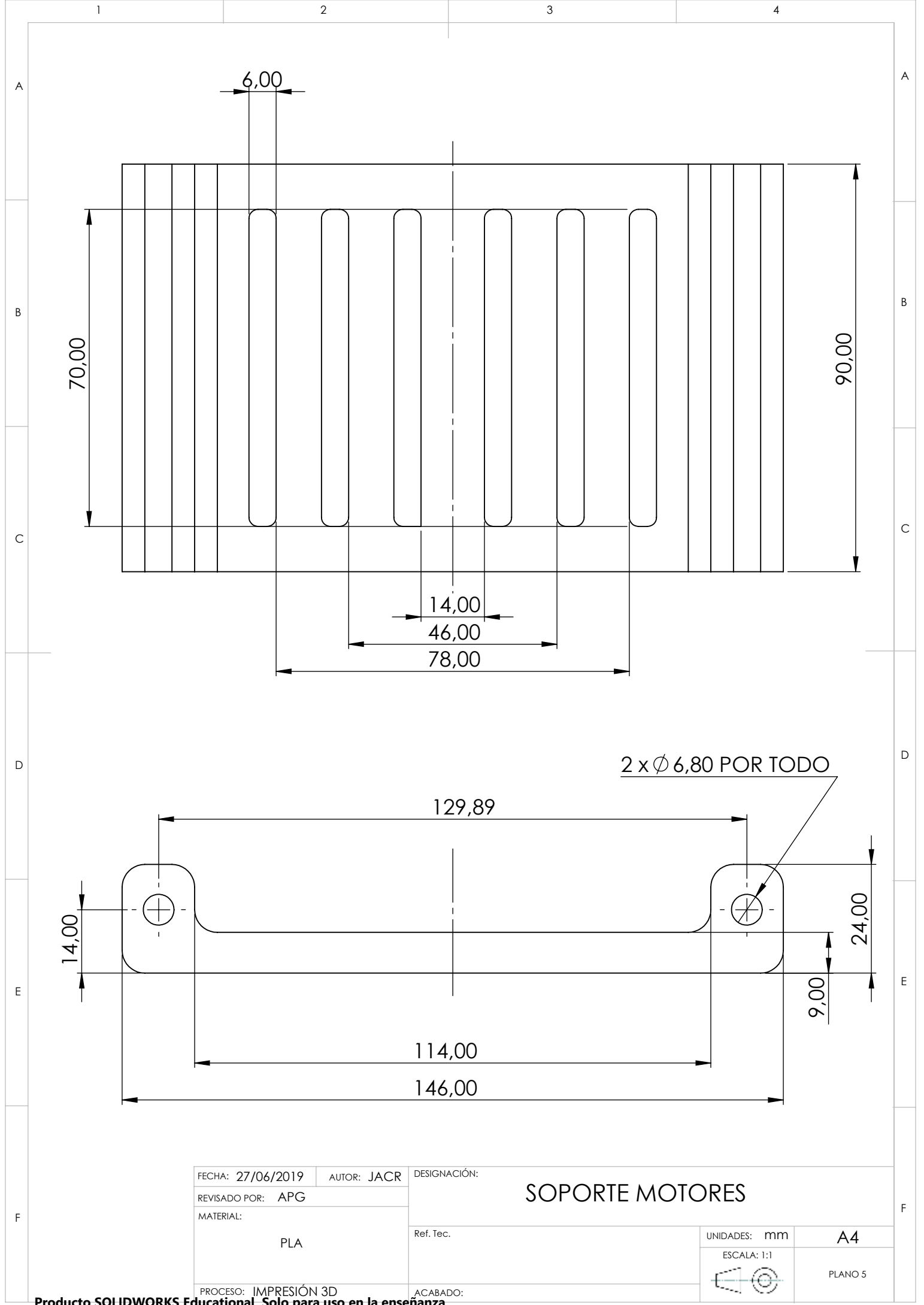


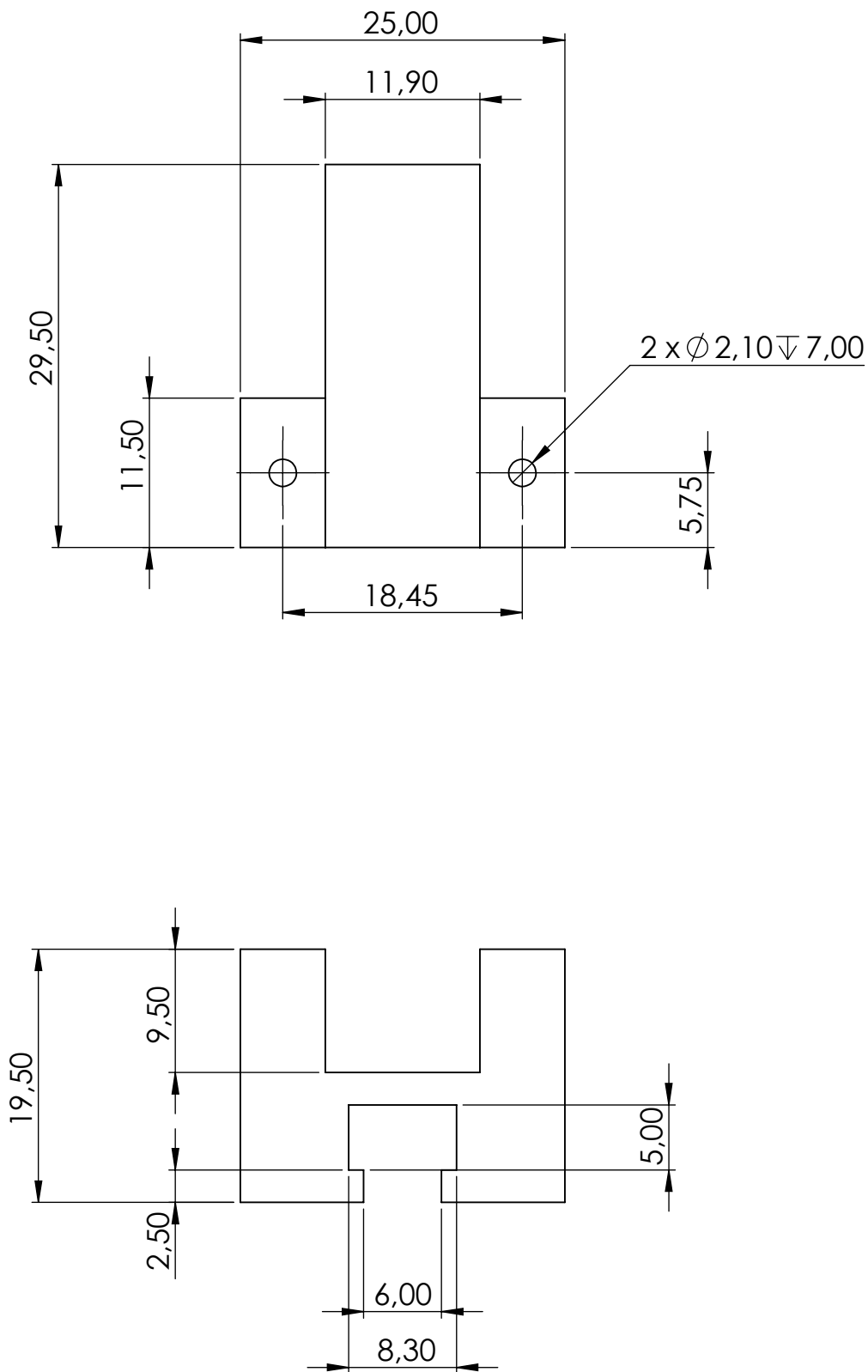
4 x \varnothing 7,00 POR TODO
 \square \varnothing 11,00 ∇ 6,40

FECHA: 27/06/2019	AUTOR: JACR	DESIGNACIÓN:	BRIDA DE ANCLAJE Y TAPA DE LA BRIDA DE ANCLAJE	
REVISADO POR: APG		Ref. Tec.		
MATERIAL:	ACERO INOXIDABLE		UNIDADES: mm	A4
PROCESO:	ACABADO:		ESCALA: 1:2	PLANO 3



FECHA: 27/06/2019	AUTOR: JACR	DESIGNACIÓN: SOPORTE IMMA HAND			
REVISADO POR: APG					
MATERIAL: PLA	Ref. Tec.		UNIDADES: mm	A4	
PROCESO: IMPRESIÓN 3D	ACABADO:		ESCALA: 1:1	PLANO 4	





FECHA: 27/06/2019	AUTOR: JACR	DESIGNACIÓN:	
REVISADO POR: APG			
MATERIAL:		Ref. Tec.	
PLA			
PROCESO: IMPRESIÓN 3D	ACABADO:	UNIDADES: mm	A4
		ESCALA: 2:1	PLANO 6